

Politechnika Śląska  
Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

ROZPRAWA DOKTORSKA

**Pojazd manualny dla dzieci z niepełnosprawnością ruchową o konstrukcji  
zoptymalizowanej do wytwarzania generatywnego**

mgr inż. Aleksandra Mikulíková  
Inżynieria Mechaniczna

PROMOTOR

dr hab. inż. Marek Wyleźół, prof. PŚ

PROMOTOR POMOCNICZY

dr inż. Małgorzata Muzalewska

Gliwice 2024



## Spis treści

Wykaz skrótów .....	3
Rozdział 1. Wstęp .....	5
1.1. Wprowadzenie .....	5
1.2. Problem badawczy .....	7
1.3. Cele rozprawy .....	9
1.4. Tezy rozprawy.....	11
1.5. Zakres rozprawy .....	11
Rozdział 2. Przegląd istniejącego stanu wiedzy.....	13
2.1. Różnorodność konstrukcji wózków inwalidzkich.....	13
2.1.1. Historia i podział wózków inwalidzkich .....	14
2.1.2. Wózki aktywne.....	17
2.1.3. Aktywne wózki inwalidzkie i pojazdy dla dzieci .....	21
2.2. Grupa docelowa .....	28
2.3. Optymalizacja konstrukcji.....	33
2.3.1. Optymalizacja topologiczna w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym .....	39
2.3.2. Optymalizacja topologiczna konstrukcji architektonicznych .....	41
2.3.3. Optymalizacja topologiczna we wzornictwie przemysłowym.....	42
2.3.4. Optymalizacja topologiczna w inżynierii rehabilitacyjnej.....	44
2.4. Technologie użyteczne do wytwarzania obiektów o konstrukcjach zoptymalizowanych topologicznie .....	46
2.4.1. Odlewanie elementów o konstrukcjach zoptymalizowanych topologicznie .....	47
2.4.2. Generatywne technologie wytwarzania konstrukcji zoptymalizowanych .....	48
2.4.2.1. Technologia FDM.....	52
Rozdział 3. Problem badawczy i proces projektowo-konstrukcyjny .....	58
3.1. Problem badawczy i założenia projektowe.....	58
3.2. Proces projektowo-konstrukcyjny .....	60
3.2.1. Analiza możliwych rozwiązań .....	60

3.2.2. Geometryczne cechy konstrukcyjne .....	71
3.2.3. Materiałowe cechy konstrukcyjne.....	72
3.2.4. Technologiczne cechy konstrukcyjne .....	73
3.2.5. Dynamiczne (montażowe) cechy konstrukcyjne .....	75
3.2.6. Prototyp .....	77
3.2.7. Walidacja i weryfikacja prototypu.....	87
Rozdział 4. Badania symulacyjne.....	94
4.1. Metodyka postępowania.....	94
4.2. Warunki brzegowe i obciążenia.....	95
4.2.1. Rozpatrywane przypadki obciążeń.....	96
4.2.2. Analiza wytrzymałościowa i optymalizacja topologiczna.....	100
4.3. Dyskusja i wybór rozwiązania optymalnego.....	126
Rozdział 5. Podsumowanie.....	129
5.1. Podsumowanie .....	129
5.2. Wnioski i obserwacje .....	132
5.3. Osiągnięcia oryginalne .....	133
5.4. Kierunki dalszych prac.....	133
Literatura .....	136
Streszczenie .....	146
Summary .....	149

## Wykaz skrótów

- ABS – Acrylonitrile butadiene styrene (Terpolimer Akrylonitrylo-butadieno-styrenowy)
- ASE – Anisotropic-Solid/Empty (Anizotropowy-Stały/Pusty)
- ATO – Adaptive Topology Optimization (Adaptacyjna Optymalizacja Topologiczna)
- BESO – Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (Dwukierunkowa Ewolucyjna Optymalizacja Strukturalna)
- BM – Bubble Method (Metoda Bąbelkowa)
- CAD – Computer-Aided Design (Komputerowe Wspomaganie Projektowania)
- CAX – Computer-Aided x (Komputerowego Wspomaganie wielu technologii)
- DLP – Digital Light Processing (Cyfrowe Przetwarzanie Światła)
- DMLS – Direct Metal Laser Sintering (Bezpośrednie Spiekanie Laserowe Metalu)
- FDM – Fused Deposition Material (Osadzanie Uplastycznionego Materiału)
- GA – Genetic Algorithms (Algorytmy Genetyczne)
- GSO – Generalized Shape Optimization (Optymalizacja Kontinuum Materialnego)
- ISE – Isotropic-Solid/Empty (Izotropowy-Stały/Pusty)
- ISEP – Isotropic-Solid/Empty-Porous (Izotropowy-Stały/Pusty-Porowaty)
- LO – Layout Optimization (Optymalizacja Układu)
- LOM – Laminated Object Manufacturing (Wytwarzanie Obiektów Laminiowanych)
- MES – Metoda Elementów Skończonych
- MSLA – Masked Stereolithography (Maskowana Stereolitografia)
- NOM – Near Optimal Microstructure (Najbliższa Optymalna Mikrostruktura)
- OMP – Optimal Microstructure with Penalization (Optymalna Mikrostruktura z Penalizacją)
- PET-G – Polyethylene terephthalate glycol-modified (Tereftalan polietylenu z dodatkiem glikolu)
- PLA – Polylactic acid (Poliaktyd)
- PMMA – poly(methyl methacrylate) (Szkło Akrylowe)
- SIMP – Solid Isotropic Microstructure with Penalization (Stała izotropowa mikrostruktura z penalizacją)
- SLA – Stereolithography (Stereolitografia)
- SLM – Selective Laser Melting (Selektywne Stapianie Laserowe)
- SLS – Selective Laser Sintering (Selektywne Spiekanie Laserowe)
- SM – Multiple sclerosis (Stwardnienie rozsiane)
- SMA – Spinal Muscular Atrophy (Rdzeniowy zanik mięśni)



„Jeśli umiecie diagnozować radość dziecka i jej natężenie, musicie dostrzec, że najwyższą jest radość pokonanej trudności, osiągniętego celu, odkrytej tajemnicy. Radość tryumfu i szczęście samodzielności, opanowania, władania [67].”

Janusz Korczak

## Rozdział 1.

### Wstęp

Niniejsza rozprawa doktorska jest pracą interdyscyplinarną łączącą dyscypliny: inżynierii mechanicznej, ergonomii, inżynierii rehabilitacyjnej oraz wytwarzania addytywnego. Wszystkie te dziedziny posłużyły do opracowania konstrukcji oraz wytworzenia prototypu autorskiego pojazdu napędzanego ręcznie, służącego do samodzielnego przemieszczania się dzieci z niepełnosprawnością ruchową kończyn dolnych w wieku od ok. 9 miesięcy życia do ok. 4 lat. Ponadto konstrukcja pojazdu uwzględnia docelową generatywną technologię wytwarzania – FDM (ang. *Fused Deposition Material*) i zastosowanie optymalizacji topologicznej (ang. *topology optimization*) w kontekście dystrybucji tworzywa wypełnienia modeli podczas procesu wytwarzania. Wspomniana optymalizacja topologiczna zastosowana na etapie realizacji procesu projektowo-konstrukcyjnego poszczególnych elementów, które docelowo mają być wytwarzane za pomocą technologii FDM ma na celu przede wszystkim wytworzenie optymalnej struktury wypełnienia, która powinna przenosić zadane obciążenia oraz minimalizację masy końcowej pojazdu. Wynikiem dysertacji jest zweryfikowany prototyp w pełni funkcjonalnego manualnego pojazdu rehabilitacyjnego.

W rozdziale pierwszym znajduje się wprowadzenie do podjętego tematu badań, opisany został problem naukowy i cele prowadzonych badań. W rozdziale tym znajdują się także tezy niniejszej dysertacji oraz opisany jest jej zakres.

#### 1.1. Wprowadzenie

Realizacja procesu projektowania inżynierskiego zmienia się bardzo dynamicznie od czasu wprowadzenia pierwszych systemów komputerowych. W przeciągu ostatnich kilkudziesięciu lat powstał szereg narzędzi informatycznych, które pozwalają współczesnym inżynierom efektywniej wykonywać swoją pracę. Dawniej praca konstruktora opierała się przede wszystkim na jego wiedzy, doświadczeniu, ale i zdolnościach kreślarskich.

Zaprojektowane obiekty wprowadzicie spełniały swoje zadania i wymagane kryteria, ale często ich postać geometryczna była przewymiarowana, a masa zawyżona. Przełom nastąpił u schyłku XX. wieku wraz z użyciem komputerów do realizacji procesu projektowo-konstrukcyjnego. Wraz z rozwojem metod obliczeniowych, w tym Metody Elementów Skończonych (MES), konstruktorzy zaczęli uwzględniać w procesie projektowania nawet najbardziej skomplikowane obliczeniowe odkształcenia i pochodzące od nich naprężenia. W wyniku przeniesienia tradycyjnych technik kreślarskich „z papieru” do środowiska wirtualnego praca konstruktorów stała się znacznie łatwiejsza (co nie znaczy, że wspomniana „wiedza” przestała być potrzebna). Dodatkowo metody projektowania komputerowego CAD (ang. *Computer Aided Design*) zostały stopniowo zmodyfikowane o dodatkowe możliwości, takie jak modelowanie 3D, analizy wytrzymałościowe i inne, co pozwoliło inżynierom skupić się bardziej na konstrukcyjnej stronie pracy, a mniej na żmudnych i powtarzalnych czynnościach (tzw. czynnościach rutynowych). Dziś naturalnym jest wykorzystywanie środowisk wirtualnych klasy – już nie tylko CAD – ale zintegrowanych systemów klasy CAx (ang. *Computer Aided x*) - przez inżynierów i konstruktorów. Obecnie trójwymiarowe modele czy rysunki techniczne mogą być przechowywane w pamięci wirtualnej („w chmurze”), co umożliwia bezpośredni dostęp do nich kontrahentom i zleceniodawcom oraz znacznie usprawnia proces projektowy, a także poprawia komunikację w zespole projektowym. Ponadto w obecnych czasach inżynierowie mają dostęp do szeregu narzędzi, które usprawniają ich pracę w procesie projektowania. Dzisiejsza technika poszerza możliwości inżynierii od narzędzi przeznaczonych do projektowania wspomaganego komputerowo, poprzez urządzenia wytwarzania generatywnego, po rzeczywistość wirtualną oraz sztuczną inteligencję. Producenci wdrażają nowe rozwiązania z zastosowaniem m.in. lżejszych materiałów konstrukcyjnych w celu zmniejszenia ich masy, a przez to obniżenia ceny produktu oraz kosztów eksploatacyjnych. Obniżenie masy struktury wymaga zaś odpowiedniego zachowania jej parametrów wytrzymałościowych. Normy dotyczące bezpieczeństwa w tych dziedzinach (zwłaszcza w przemyśle lotniczym czy samochodowym) są bardzo restrykcyjne. Jednym ze sposobów utrzymania, a nawet poprawy parametrów wytrzymałościowych przy minimalizacji masy konstrukcji jest włączenie w proces projektowania optymalnego, czyli świadomego i sformalizowanego wykorzystania procedur optymalizacyjnych (m.in. optymalizacji topologicznej [33]) w całym procesie projektowania.

Optymalizacja topologiczna jest rodzajem metody obliczeniowej, która umożliwia uzyskanie optymalnego rozkładu tworzywa w danej przestrzeni



projektowej dla określonego zestawu ograniczeń (np. obciążeń, warunków brzegowych). Metoda ta wymaga zastosowania odpowiednich algorytmów, współcześnie już opracowanych i zaimplementowanych w systemach komputerowych (np. w takich programach, jak: Altair Inspire [2], AUTODESK Fusion 360 [4], SOLIDWORKS Simulation Professional [113], Dassault Systemes – SIMULIA [20], ANSYS Mechanical [3], których wykorzystywanie ma obecnie charakter proceduralny. Podczas obliczeń dany program bazuje na MES, a do uzyskania optymalnych wyników wykorzystuje algorytmy sztucznej inteligencji. Stosowanie optymalizacji topologicznej w procesie projektowo-konstrukcyjnym umożliwia realną redukcję masy projektowanego wytworu przy zachowaniu pożądanych własności wytrzymałościowych oraz sztywności. Efektem optymalizacji topologicznej jest często nowa postać geometryczna danego obiektu, posiadająca czasem nietechniczny oryginalny kształt (często jest to kształt biomorficzny). Wpływ na rozwój optymalizacji topologicznej i na wzrost jej popularności miały także rozwijające się technologie generatywne (zwane potocznie drukiem 3D), które obok tradycyjnych technologii wytwarzania (np. odlewnictwo, obróbka ubytkowa, wtryskiwanie tworzyw sztucznych) dały inżynierom nowe możliwości wytwarzania elementów o niekonwencjonalnym kształcie. Przedmioty codziennego użytku zaczęły przybierać np. organiczne formy, opływowe i nieregularne postacie geometryczne.

## **1.2. Problem badawczy**

Problem badawczy poruszony w ramach niniejszych badań jest rezultatem wykonanych obserwacji istniejącego stanu rzeczy w dziedzinie projektowania, wytwarzania i dystrybucji pojazdów rehabilitacyjnych (wózków, jeźdźników) przeznaczonych dla dzieci w wieku do ok. 4 lat z dysfunkcją kończyn dolnych.

Wiele dzieci z niepełnosprawnością kończyn dolnych porusza się, pełzając lub czołgając się po podłodze, co ogranicza miejsce egzystowania, w tym zabaw tylko do powierzchni domowych. Zapotrzebowanie na urządzenia, które ułatwiają najmłodszym użytkownikom codzienne funkcjonowanie oraz przywracają im godność i samodzielność jest stosunkowo duże, natomiast wybór i dostępność tego typu produktów są bardzo ograniczone. Głównym spostrzeżeniem z poczynionych obserwacji jest brak na rynku pojazdów o cechach adaptacyjnych w zakresie wymiarów rosnących dzieci w zakresie wieku do lat 4, których cena nabycia nie byłaby zaporową dla większości rodziców czy opiekunów dzieci ze wspomnianą niepełnosprawnością ruchową w zakresie kończyn dolnych.

Wynikiem tych obserwacji jest podjęcie działań inżynieryjno-badawczych mających na celu:

1. skonstruowanie autorskiego pojazdu o napędzie manualnym dla dzieci w wieku do 4 lat z niepełnosprawnością ruchową kończyn dolnych w celu poprawy jakości ich życia,
2. nadanie konstrukcji pojazdu cech adaptacyjności wymiarowej (dostosowanie do rosnącego dziecka),
3. nadanie pojazdowi pożądanych cech użytecznych, umożliwiających sprawne poruszanie się dzieci w pomieszczeniach mieszkalnych,
4. zoptymalizowanie konstrukcji pojazdu pod względem możliwości jego wytworzenia z użyciem najpopularniejszej obecnie technologii wytwarzania generatywnego (FDM), co wiąże się z jego odpowiednim podziałem na elementy składowe,
5. zastosowanie optymalizacji topologicznej w celu uzyskania optymalnej dystrybucji tworzywa w objętości poszczególnych elementów pojazdu, a przez to podjęcie próby minimalizacji masy pojazdu.

Każdy z tych punktów wymagał osobnego podejścia nie tylko inżynieryjnego (konstrukcja), ale również wymagał zastosowania badawczych metod naukowych w celu uzyskania odpowiedzi na powstałe pytania i niewiadome.

Główne badania naukowe koncentrują się w szczególności na analizie różnych konfiguracji wypełnienia wydruków poszczególnych elementów pojazdu jako wynik zastosowania optymalizacji topologicznej. Ponadto, badania obejmują również porównanie tych wyników pod względem wytrzymałościowym, a także pod względem technologicznym i ekonomicznym z regularną strukturą wypełnienia generowaną przez oprogramowanie drukarki FDM.

Podjęty problem badawczy posiada elementy nowatorskie ze względu na zaproponowaną konstrukcję pojazdu, dzięki której możliwe będzie – w przewidzianym zakresie - dostosowanie pojazdu do wymiarów użytkownika (dziecka). Ponadto, zaproponowany sposób optymalizacji topologicznej wypełnienia wydruków i wytworzenie w pełni funkcjonalnego urządzenia rehabilitacyjnego za pomocą technologii FDM stanowi pewnego rodzaju innowację w projektowaniu tego typu urządzeń.

Realizacja badań obejmuje rozwiązania szeregu problemów szczegółowych, m. in:

- Przegląd i analizę dostępnych rozwiązań w zakresie sprzętu do rehabilitacji i poruszania się dzieci.
- Przegląd istniejących norm i przepisów dotyczących tego typu urządzeń.
- Zdefiniowanie użytkownika docelowego i określenie jego parametrów, które determinują postać geometryczną projektowanego urządzenia.
- Wybór technologii wytwarzania i docelowego materiału.
- Określenie kryteriów i wymagań wynikających z konstrukcji, przeznaczenia oraz użytkowania pojazdu poprzez m.in. konsultacje z rodzicami, opiekunami, lekarzami oraz rehabilitantami chorych dzieci.
- Opracowanie postaci konstrukcyjnej pojazdu manualnego przeznaczonego do samodzielnego przemieszczania się dzieci z niepełnosprawnością ruchową kończyn dolnych.
- Dostosowanie poszczególnych elementów wyrobu do wytwarzania za pomocą technologii FDM.
- Wytworzenie prototypu.
- Weryfikacja prototypu, szczególnie pod względem ergonomii oraz łatwości i bezpieczeństwa obsługi.
- Optymalizacja konstrukcji poprzez rozpatrzenie różnych przypadków wypełnienia objętości modeli, m.in. za pomocą optymalizacji topologicznej.
- Analizę wyników wykonanych badań z uwzględnieniem wymagań konstrukcyjnych i technologicznych.

### **1.3. Cele rozprawy**

Mając na uwadze opisany problem badawczy – określono szczegółowe cele niniejszej dysertacji.

Celem projektowym rozprawy doktorskiej jest skonstruowanie pojazdu – wózka (jeździka) przeznaczonego dla dzieci z dysfunkcją kończyn dolnych w wieku od ok. 9. miesiąca życia (od kiedy dzieci posiadają umiejętność samodzielnego siedzenia) do ok. 4 lat w taki sposób, aby mógł być wytwarzany za pomocą najpopularniejszej współcześnie technologii generatywnej – FDM jako w pełni funkcjonalne urządzenie. Problemem wymagającym osobnych badań jest opracowanie adaptacyjnej konstrukcji pojazdu dla wspomnianych dzieci (wózek – „rosnący” z użytkownikiem) wraz z uzyskaniem atrakcyjnej wizualnie postaci geometrycznej. Szczególnie istotnym aspektem procesu projektowego jest skupienie się na użytkowniku docelowym. Cały proces projektowy został ukierunkowany na potrzebach i zachowaniu docelowego

użytkownika (tzw. *Human Centered Design*). Podejście to umożliwia wytworzenie produktu użytecznego i przyjaznego dla użytkowników, a nie tylko funkcjonalnego.

Głównym celem naukowym rozprawy jest optymalizacja konstrukcji za pomocą m.in. implementacji procedur optymalizacji topologicznej w proces projektowo-konstrukcyjny. Zastosowanie optymalizacji topologicznej oraz ocena jej skuteczności odnosi się szczególnie do uzyskania optymalnej struktury wypełnienia poszczególnych elementów pojazdu, w porównaniu do struktur generowanych automatycznie przez oprogramowanie danego urządzenia wytwarzającego. Ponadto, poprzez zastosowanie procedur optymalizacji topologicznej podjęta zostaje także próba minimalizacji masy końcowej urządzenia.

Celem szczegółowym badań jest także ocena wpływu parametrów druku FDM na wytrzymałość i jakość konstrukcji.

Efektom realizacji celów dysertacji jest również uzyskanie pożądanych cech funkcjonalnych autorskiego pojazdu. Cech, które są konieczne do uzyskania w kontekście możliwości korzystania z pojazdu przez dzieci we wspomnianym zakresie wiekowym i we wspomnianym stanie zdrowotnym. Wśród tych rezultatów znajdują się:

- łatwość obsługi, co zapewni pewien stopień samodzielności dzieci z niepełnosprawnością ruchową,
- aspekty wizualne - oryginalna postać geometryczna, dizajn „przyjazny” dzieciom,
- stosowana funkcjonalność – rozumiana jako możliwość dostosowania wózka do zmieniających się rozmiarów użytkownika,
- obniżenie ceny końcowej produktu oraz jego dostępności dzięki jego dostosowaniu do wytworzenia za pomocą technologii FDM.

Oczekiwane zaś rezultaty implementacji optymalizacji topologicznej w proces projektowo-konstrukcyjny urządzenia przeznaczonego do wytwarzania za pomocą technologii FDM dotyczą kwestii użytkowych – zapewnienie pożądanej wytrzymałości pojazdu oraz (ewentualnie) minimalizacja masy końcowej urządzenia; kwestii technologicznych - ograniczenie zużycia materiału i skrócenie czasu procesu wytwarzania; a także kwestii bezpieczeństwa użytkownika wytworu – zwarta postać geometryczna ze zoptymalizowaną wyłącznie strukturą wewnętrzną, bez otworów zewnętrznych (które mogłyby być pochodną procesu optymalizacji topologicznej całego urządzenia), stwarzających ryzyko utknięcia w nich części ciała małych dzieci.

## **1.4. Tezy rozprawy**

Biorąc pod uwagę zdefiniowany problem naukowy oraz wyznaczone cele główne i szczegółowe, sformułowano następujące tezy prowadzonych badań:

- I. Możliwe jest wytworzenie w pełni funkcjonalnego urządzenia rehabilitacyjnego za pomocą najpowszechniejszej oraz stosunkowo najtańszej technologii przyrostowej - FDM, co wpłynie na cenę końcową oraz popularyzację możliwości wytwarzania tego typu urządzeń.
- II. Optymalizacja topologiczna struktury wewnętrznej elementów składowych urządzenia rehabilitacyjnego - wytwarzanych za pomocą technologii przyrostowej FDM - umożliwi uzyskanie struktury odpowiednio wytrzymałej w kontekście zdefiniowanych przypadków obciążeń oraz pozwoli na minimalizację masy urządzenia.

## **1.5. Zakres rozprawy**

Dysertacja została podzielona na pięć rozdziałów. Pierwszy rozdział zawiera wprowadzenie do tematu historii konstruowania inżynierskiego oraz rozwoju i zmian w realizacji procesu projektowo-konstrukcyjnego, a także narzędzi, które wspomagają proces projektowania z wyszczególnieniem optymalizacji topologicznej. Rozdział ten zawiera również zdefiniowany problem naukowy, opisane cele i tezy rozprawy, a także jej zakres.

Rozdział drugi składa się z czterech podrozdziałów, w których przedstawiony jest następująco: przegląd istniejącego stanu wiedzy na temat historii i różnorodności konstrukcji wózków inwalidzkich z wyszczególnieniem pojazdów przeznaczonych dla najmłodszych użytkowników, opis wybranej grupy docelowej, opis optymalizacji konstrukcji z wyszczególnieniem optymalizacji topologicznej oraz jej zastosowań praktycznych w różnych dziedzinach, a także opis technologii użytecznych do wytwarzania konstrukcji zoptymalizowanych topologicznie ze szczególnym uwzględnieniem technologii FDM.

Trzeci rozdział dotyczy procesu projektowo-konstrukcyjnego. Opisane w nim zostały założenia projektowe, a także zaprezentowano w nim pole możliwych rozwiązań i analizowane koncepcje pojazdu. W rozdziale tym przedstawione zostały cechy konstrukcyjne geometryczne (dotyczące rozmiarów), a także materiałowe (dotyczące tworzywa), technologiczne (dotyczące wybranej technologii wytwarzania – FDM) oraz dynamiczne (dotyczące montażu elementów składowych). Na końcu rozdziału przedstawiony został proces projektowania i wytwarzania prototypu

urządzenia rehabilitacyjnego oraz jego weryfikacja szczególnie pod względem ergonomii i łatwości użytkowania przez grupę dzieci.

Czwarty rozdział opisuje badania symulacyjne prowadzone na modelu bryłowym pojazdu. Na początku przedstawione są warunki brzegowe i różne przypadki obciążeń działających na pojazd. Rozdział zawiera analizę wytrzymałościową konstrukcji z uwzględnieniem różnych parametrów wpływających na wzór i gęstość wypełnienia elementów drukowanych w technologii FDM, a ponadto zawarta w nim została także optymalizacja topologiczna wypełniania modeli. Na końcu rozdziału zestawione są wyniki analizy i przedstawione jest porównanie różnych rodzajów wypełnienia wydruków oraz ich wpływ na masę końcowego modelu, zużycie materiału oraz czas wytwarzania.

Rozdział piąty kończy dysertację i zawiera podsumowanie przeprowadzonych badań, a także wnioski z nich płynące. Ponadto w rozdziale tym przedstawione zostały proponowane kierunki dalszych badań.

## **Rozdział 2.**

### **Przegląd istniejącego stanu wiedzy**

Przeprowadzone badania stanowią syntezę wiedzy z zakresu różnych dziedzin, m.in.: inżynierii mechanicznej, rehabilitacyjnej, a także wzornictwa przemysłowego. W rozdziale drugim przedstawiony został przegląd istniejącego stanu wiedzy z wymienionych wyżej zagadnień, które szczególnie dotyczą podjętego tematu. Podrozdział 2.1. przedstawia przegląd oraz różnorodność konstrukcji wózków inwalidzkich i innych pojazdów rehabilitacyjnych, szczególnie manualnych pojazdów przeznaczonych dla najmłodszych pacjentów. Ponadto w tym podrozdziale wyszczególniono także normy, które dotyczą konstruowania wózków inwalidzkich. Podrozdział 2.2. definiuje użytkownika docelowego, na którym skupione są niniejsze badania. W podrozdziale tym zawarte są m.in. siatki centylowe oraz szczegółowe wymiary dzieci w zakresie wieku od 9. miesiąca życia aż do ok. 4 lat, które stanowią odniesienie geometryczne w procesie projektowo-konstrukcyjnym. Podrozdział 2.3. dotyczy optymalizacji konstrukcji i zawiera definicję samej optymalizacji topologicznej, a także obszarów jej zastosowań. Podrozdział 2.4. krótko przedstawia przegląd technologii użytecznych do wytwarzania konstrukcji zoptymalizowanych, które są spójne z tematyką niniejszej pracy. Szczególna uwaga zwrócona została na technologie generatywne – druk FDM.

#### **2.1. Różnorodność konstrukcji wózków inwalidzkich**

Dziedzina zainteresowania niniejszych badań dotyczy szczególnie manualnych pojazdów rehabilitacyjnych przeznaczonych do przemieszczania się najmłodszych użytkowników ograniczonych ruchowo tymczasowo (urazy kończyn dolnych, zwichnięcia, złamania) lub permanentnie (niepełnosprawność kończyn dolnych). Rehabilitacja jest procesem, który ma na celu przywrócenie lub utrzymanie pewnego stopnia sprawności fizycznej lub psychicznej pacjentowi, który utracił ją w wyniku przebytych wypadków, schorzeń, powstałych zwyrodnień, operacji czy też w wyniku postępującej choroby. Osoby, które uległy wypadkom, złamaniom kończyn i innym dysfunkcjom, bardzo często w celu powrotu do zdrowia muszą wykonywać określone ćwiczenia albo nosić specjalistyczne akcesoria, których działanie polega m.in. na usprawnianiu i/lub odciążaniu danej strefy ciała. Do realizacji prawidłowej rehabilitacji potrzebny jest (poza doświadczonym rehabilitantem) odpowiedni sprzęt i akcesoria, które umożliwiają prawidłowe wykonywanie ćwiczeń

rehabilitacyjnych czy zapewnienie ochrony danej części ciała. Kategorie produktów obejmujących urządzenia i akcesoria rehabilitacyjne to szereg wytworów przeznaczonych do przywracania sprawności głównie kończyn, umożliwiania przemieszczania się, zapobieganiu eliminacji efektu zaniku mięśni (który może być spowodowany długoterminowym unieruchomieniem kończyn, np. w wyniku gipsowania), a także do ułatwiania chorym wykonywania codziennych czynności czy nawet uprawiania sportu [97]. Sprzęt rehabilitacyjny przynosi efekty, tylko wtedy, gdy zostanie on dobrany odpowiednio do potrzeb danego pacjenta. Współczesny rynek oferuje całą gamę różnorodnych produktów rehabilitacyjnych. Często dane urządzenie o konkretnym przeznaczeniu jest reprezentowane przez liczne produkty konkurujących ze sobą firm, różniące się szczegółami postaci konstrukcyjnych, masą, użytym tworzywem, a także ceną [7, 14, 34, 46, 57, 74]. Celem rehabilitacji przy dysfunkcji ruchu jest odtworzenie zdolności i umiejętności, jakimi pacjent dysponował przed chorobą lub zrównoważenie funkcji utraconych bezpowrotnie i spowolnienie postępującej choroby. W procesie rehabilitacji trzeba szczególnie uwzględnić zapobieganie powikłaniom wynikającym z unieruchomienia pacjenta, poprawę jego samooceny, wzmacnianie motywacji do czynnego udziału w rehabilitacji oraz edukację osób z otoczenia pacjenta [72].

Dokonany w tym rozdziale przegląd urządzeń rehabilitacyjnych przeznaczonych do przemieszczania się i skierowanych dla dzieci z niepełnosprawnością ruchową obejmuje szeroki przekrój wózków aktywnych (także dla starszych użytkowników). W przeglądzie uwzględnione zostały wózki inwalidzkie i pojazdy, które nie mieszczą się ze względu na swoją postać konstrukcyjną w definicji wózków inwalidzkich, ale pełnią podobne funkcje.

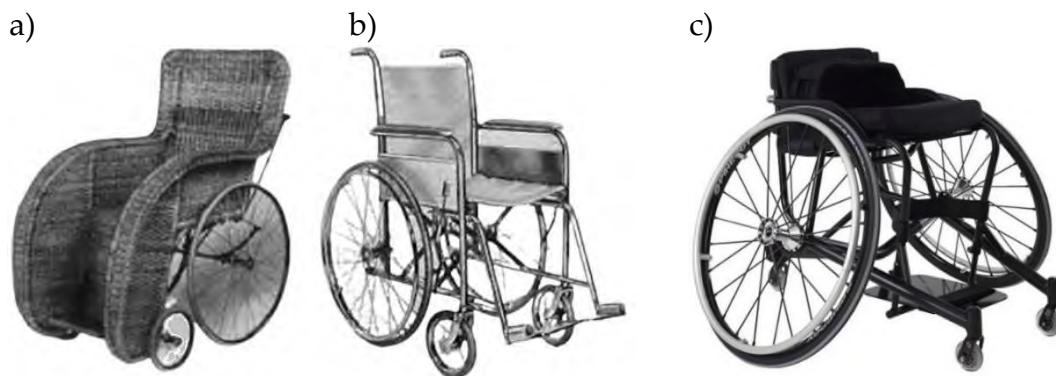
### **2.1.1. Historia i podział wózków inwalidzkich**

Wózek inwalidzki jest pojazdem, który decyduje o możliwościach zaadaptowania się do życia z niepełnosprawnością, wspomaga funkcje stabilizacji i utrzymania pozycji ciała człowieka oraz umożliwia mu przemieszczanie się. Urządzenia te wykorzystywane są zarówno w rehabilitacji medycznej, jak i społecznej (przystosowanie do funkcjonowania osób niepełnosprawnych w społeczeństwie). Wśród dostępnych wózków inwalidzkich można wyróżnić wózki o rozwiązaniach konstrukcyjnych predysponujących dane wózki do różnych zastosowań [13, 72, 92, 117].

Konstrukcje pierwszych wózków opierały się na technologii kształtowania drewna i często były dosłownie połączeniem dwóch wynalazków: krzesła i koła jeźdźnego. Projektanci pierwszych wózków inwalidzkich brali pod uwagę przy konstruowaniu jedynie kryterium funkcjonalności oraz zakładali



bierność użytkowników wózka – do przemieszczania tego wynalazku potrzebne były osoby trzecie. Postęp techniczny XX wieku był wyraźnie zauważalny w historii konstrukcji wózków. Konstrukcja wózków uległa dużej metamorfozie – z wielkogabarytowych wózków, ważących 50 kg z wiklinowymi siedziskami (Rys. 1a) przez wózki bardziej mobilne - składane, z krzyżową konstrukcją ramy (Rys. 1b), aż do zgrabnych i zwrotnych wózków aktywnych i sportowych (Rys. 1c)



Rys. 1. Wózek inwalidzki a) wiklinowy - dostępny na przełomie XIX/XX wieku [116] b) składany - firmy Everest&Jennings [116] c) sportowy GTM Tennis [131]

Mniej więcej od drugiej połowy ubiegłego wieku na rynku wózków inwalidzkich można dostrzec wyraźną stylistyczną stagnację. Najwięcej dostępnych na rynku produktów ma bardzo podobną konstrukcję. Dopiero od kilku lat można zauważyć (również na rynku polskim) nowatorskie podejście projektantów oraz oryginalne koncepcje wózków inwalidzkich. Priorytety dzisiejszych projektantów wózków całkowicie różnią się od ich poprzedników. Dzięki dostępności i rozwojowi nowych technologii wytwarzania stosowane są współcześnie całkowicie inne tworzywa. Bardzo ważne przy projektowaniu stało się kryterium estetyczne – stylistyka i dizajn produktów - powstają np. wózki ultralekkie o zminimalizowanej liczbie elementów składowych [117].

Obecnie podczas projektowania swoich wyrobów producenci muszą brać pod uwagę wiele aspektów. Przede wszystkim wózek inwalidzki musi spełniać liczne wymagania związane z konstrukcją i technologią wytwarzania oraz bezpieczeństwem użytkownika. Producent jest również zobowiązany do zapewnienia odpowiedniej dokumentacji oraz szczegółowych informacji dotyczących wyrobu. Dla wózków obsługiwanych ręcznie istnieje szereg reguł i zasad projektowania, które zawarte są w europejskich normach, m.in. [92-99]:

- PN-ISO 6440:2001P – Wózki inwalidzkie: nomenklatura, terminy i definicja,

- PN-ISO 7178-8:2002P – Wózki inwalidzkie: wymagania i metody badań wytrzymałości statycznej i odporności na uderzenia,
- PN-ISO 7176-22:2006P – Wózki inwalidzkie: procedury nastawiania,
- PN-EN 12183:2014-07E – Wózki inwalidzkie napędzane ręcznie – wymagania i metody badań,
- PN-ISO 7176-13:1998P – Wózki inwalidzkie: wyznaczanie współczynnika tarcia powierzchni do badań,
- PN-ISO 7176-11:1998P – Wózki inwalidzkie: manekiny do badań,
- PN-ISO 7176-7:2001P – Wózki inwalidzkie: pomiary siedziska i kół.

Ponadto wózek inwalidzki jest wyrobem medycznym i podlega klasyfikacji zgodnie z art. 51 rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2017/745 z dnia 5 kwietnia 2017 r. w sprawie wyrobów medycznych. Klasyfikacja uwzględnia ryzyko związane z ich stosowaniem/użytkowaniem wyrobów medycznych przyporządkowując je do następujących kategorii [66]:

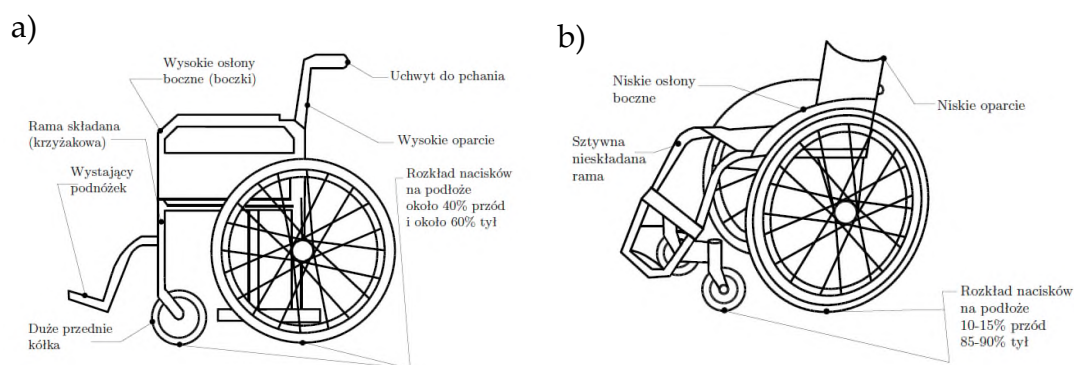
- Klasa I – zawiera przede wszystkim nieinwazyjne wyroby medyczne (np. kołnierze ortopedyczne, maski chirurgiczne/ochronne, rękawice do badań, kule ortopedyczne), a także niektóre wyroby inwazyjne do chwilowego użytku (np. narzędzia chirurgiczne użytku wielorazowego).
- Klasa IIa – zawiera m.in. inwazyjne wyroby medyczne i niektóre wyroby stosowane przez różne otwory w ciele do użytku krótkotrwałego (np. cewniki jednorazowe, termometry), wyroby mające bezpośredni kontakt z uszkodzoną skórą (np. opatrunek hydrożelowy). Do klasy IIa zaliczają się także implanty stomatologiczne, wyroby monitorujące funkcje życiowe lub procesy fizjologiczne pacjentów, a także oprogramowanie, które do tego służy.
- Klasa IIb – zawiera między innymi worki na krew, wyroby chirurgiczne, wyroby antykoncepcyjne oraz inne wyroby generujące promieniowanie jonizujące (aparaty rentgenowskie).
- Klasa III – specjalne wyroby medyczne przeznaczone np. do implantacji, przeszczepów, protezowania naczyniowego (np. implanty kości, zastawki serca, protezy naczyniowe).

Podstawą systemu klasyfikacji wyrobów medycznych jest potencjalne ryzyko związane ze stosowaniem bądź użytkowaniem wyrobu i możliwą jego niezdatnością. Klasyfikacja bazuje na szeregu kryteriów związanych z aspektami m.in. czasu trwania kontaktu wyrobu z organizmem, miejscem kontaktu, stopniem inwazyjności, działaniem miejscowym albo ogólnoustrojowym. Klasyfikacja wyrobów medycznych jest istotna, ponieważ determinuje rodzaj

procedury oceny zgodności, którą ma wykonać wytwórca, aby zapewnić, że oceniany wybór spełnia wymagania zasadnicze. Im wyższa klasa wyrobu, tym bardziej restrykcyjna jest procedura oceny zgodności. Wózek inwalidzki należy do grupy wyrobów medycznych i jest skategoryzowany w najniższej – I. klasie ryzyka.

Wózki inwalidzkie mają wiele postaci konstrukcyjnych w zależności od zadań, jakie mają spełniać. Zasadniczo wśród wózków inwalidzkich wyróżnia się [95, 117]:

- wózki z napędem ręcznym:
  - uniwersalne (Rys. 2a),
  - aktywne (Rys. 2b),
  - sportowe,
  - specjalne (np. do pionizacji, toaletowy),
  - z napędem dźwigniowo-korbowym,
  - rowery z napędem ręcznym;
- wózki z napędem elektrycznym;
- wózki hybrydowe;
- wózki prowadzone przez opiekuna.



Rys. 2. Porównanie schematyczne: a) wózka uniwersalnego i b) wózka aktywnego [117]

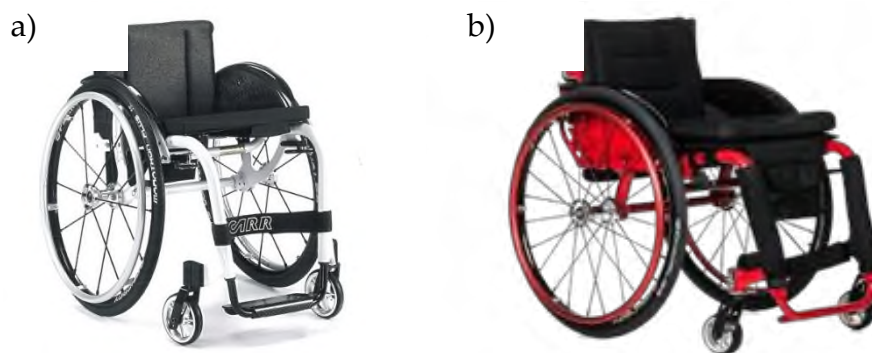
Najważniejszym czynnikiem dla użytkownika wózka inwalidzkiego (niezależnie od wieku) jest samodzielność, dlatego głównym obiektem badań jest szczególny przypadek wózka z napędem ręcznym – tzw. wózek aktywny, który ma za zadanie aktywizować pacjenta; pomagać mu budować relacje społeczne.

### 2.1.2. Wózki aktywne

Wózki aktywne najczęściej służą użytkownikom z niepełnosprawnością spowodowaną urazami rdzenia kręgowego, uszkodzeniami aparatu ruchu (amputacji), wadami wrodzonymi. Najważniejsze cechy wózka aktywnego to [34]:

- zapewnienie samodzielności i niezależności od osób trzecich w przemieszczaniu się,
- bardzo duży zasięg wykorzystania, pokonywanie barier architektonicznych,
- minimalna liczba elementów dodatkowych,
- lekka i zwrotna konstrukcja,
- atrakcyjny dizajn,
- dokładne dopasowanie do użytkownika.

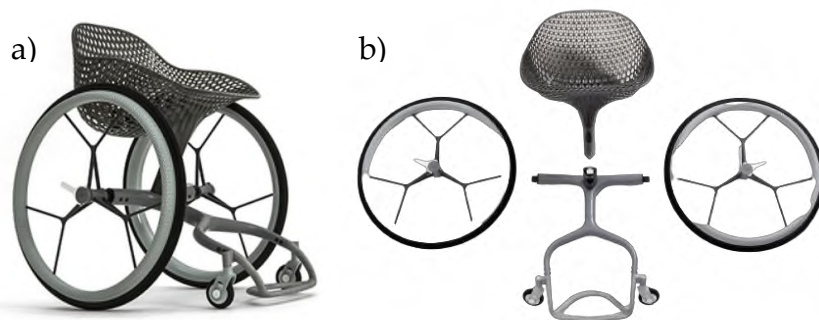
Wśród wózków aktywnych różnych producentów można dostrzec wyraźne podobieństwo konstrukcji (zazwyczaj rama stała z giętych i spawanych profili - np. Rys. 3). W grupie wózków aktywnych wyróżniają się szczególnie te, których postać konstrukcyjna ma nowoczesną designerską formę. Niestety, ale takich produktów na współczesnym, a zwłaszcza krajowym rynku jest jednak jeszcze bardzo mało. Jest to spowodowane m.in. potrzebą większego nakładu pracy do powstania takich urządzeń i to nie tylko inżyniera-konstruktora, ale również дизайнера, zwykle dobrze rozumiejącego współczesne potrzeby pacjentów. Większość osób niepełnosprawnych „skazana” jest na zakup sprzętu taniego, wprawdzie funkcjonalnego, lecz często o bardzo tradycyjnej lub wręcz archaicznej budowie, przy tym zwykle dużej masie itd. Ich doświadczenia emocjonalne są wtedy zwykle bardzo negatywne, gdyż poza doznanym urazem, ograniczeniem funkcji życiowych, stają się użytkownikami sprzętu czy urządzeń rehabilitacyjnych, które swoim wyglądem wizualnym powodują dodatkową negatywną reakcję osób trzecich [64].



Rys. 3. Wózki aktywne: a) Offcarr Funky, producent: Mobilex [133], b) Tornado, producent: Vitea Care [137]

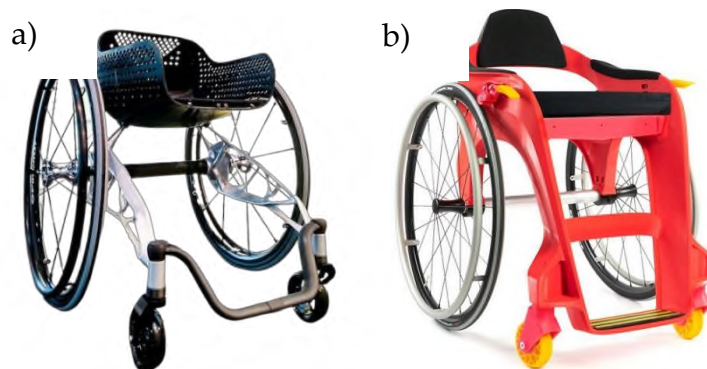
Stosunkowo łatwo jest współcześnie wskazać liczne designerskie wizualizacje wózków inwalidzkich (np. Rys. 4 – projekt wózka aktywnego GO powstałego w wyniku współpracy firmy LAYER i Materialise, dopasowanego „na miarę” użytkownika za pomocą technologii skanowania 3D oraz druku 3D [127]). Wynika to m.in. z coraz większej świadomości osób zajmujących się

dizajnem dotyczących potrzeb ludzi wymagających czasowej lub stałej rehabilitacji. Jest to też pochodną rozwoju współczesnej ergonomii, która coraz częściej stanowi podstawę działań projektantów [72, 108, 141, 142, 148]. Niestety, licznie istniejące projekty są często wyłącznie ilustracją słusznych zamysłów dizajnerów, które nigdy nie zostały zrealizowane i wprowadzone na rynek. Często dizajnerskie koncepcje nigdy nie zostają poddawane technicznej ani technologicznej weryfikacji czy walidacji, tak więc ich prawdopodobieństwo technicznej i technologicznej możliwości wytworzenia pozostaje pod znakiem zapytania.



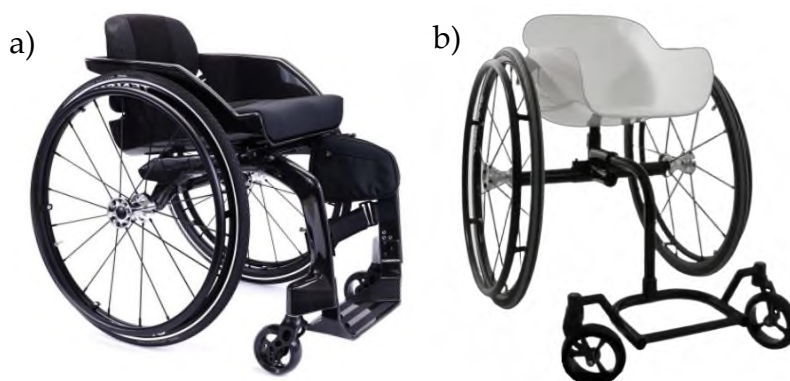
Rys. 4. Projekt koncepcyjny wózka dopasowanego do użytkownika za pomocą skanowania 3D [127]

Dzięki postępowi technicznemu i rozwojowi technologii addytywnych można także znaleźć przykłady wózków inwalidzkich, których elementy (np. siedziska, części ramy) zostały odpowiednio zoptymalizowane i wytworzone za pomocą technologii addytywnych. Często są to wytwory jednostkowe, które służą jako egzemplarze reklamowe możliwości danej firmy (np. Rys. 5a - prototyp wózka ze zoptymalizowanymi topologicznie elementami ramy oraz siedziskiem wytworzonym za pomocą technologii generatywnych - zaprezentowany przez Autodesk University w Londynie w 2018 r. [138]) czy wózki powstałe w ramach projektów badawczych (np. Rys. 5b prototyp aktywnego wózka inwalidzkiego o nowoczesnej stylistyce i masie 3 kg, którego rama wydrukowana została jako jeden element za pomocą technologii FDM [62]).



Rys. 5. Prototyp wózka aktywnego: a) Autodesk University [138] b) wózek Easy – Cosmotech sp. z o.o. [62]

Indywidualizm i personalizacja projektów dla użytkownika docelowego jest trendem dzisiejszego świata wzornictwa. Projektanci często podkreślają znaczenie skoncentrowania uwagi na potrzebach użytkownika docelowego w procesie projektowania. Tendencję indywidualizacji wózków inwalidzkich można dostrzec analizując przykłady takie jak wózek *CarboEasy* firmy Cosmotech sp. z o.o. (Rys. 6a) czy *Reagiro* - Reto Togni'ego (Rys. 6b).



Rys. 6. Nowoczesne wózki inwalidzkie dopasowane do użytkownika: a) *CarboEasy* [62] b) wózek *Disrupt Disability* [125]

*CarboEasy* jest wózkiem modułowym, posiadającym łatwe w obsłudze mechanizmy montażu elementów, co umożliwi użytkownikowi na dowolną zmianę jego komponentów np. typ oparcia (kubekowy czy tradycyjny), szerokość siedziska (36, 38, 40 lub 42 cm) itp. Dzięki zastosowaniu kompozytów (karbon) i optymalnej konstrukcji ramy, masa transportowa wózka (rama bez kół) wynosi zaledwie 4,4 kg, a maksymalna dopuszczalna masa użytkownika to 110 kg. Natomiast wózek przedstawiony na Rys. 6b jest wynikiem współpracy Rachel Wallach oraz firmy *Disrupt Disability* i skoncentrowany na konkretne potrzeby użytkownika, jak m.in. minimalizm konstrukcji oraz personalizacja stylistyczna (np. kształt, kolor siedziska i pozostałych elementów) [125].

Analizowane powyżej przykłady przeznaczone są przede wszystkim dla grupy pacjentów dorosłych. Wózki inwalidzkie dla dorosłych stanowią największą i najbardziej zróżnicowaną grupę produktów rehabilitacyjnych i pomocniczych na rynku.

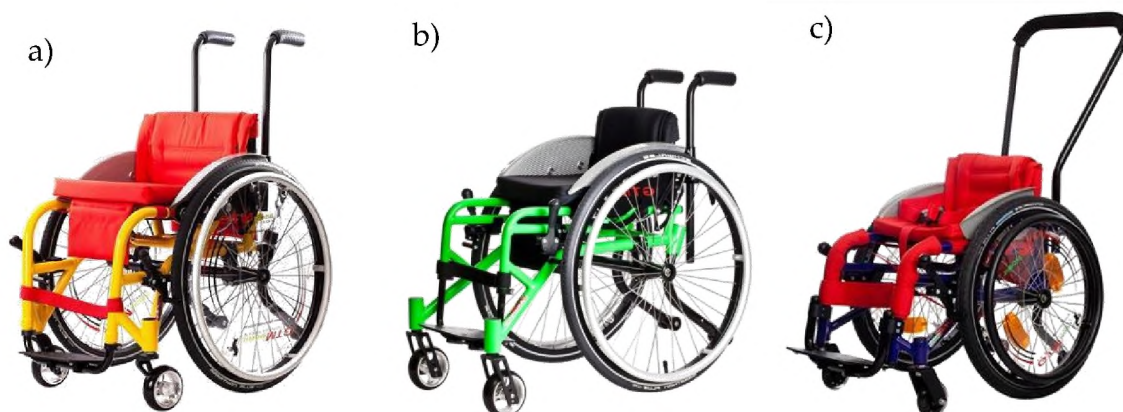
### 2.1.3. Aktywne wózki inwalidzkie i pojazdy dla dzieci

Analizując wózki aktywne dziecięce można zauważyć, że na rynku dostępnych jest o wiele mniej rozwiązań konstrukcyjnych w porównaniu do wózków aktywnych dla osób dorosłych. Najczęściej konstrukcja wózków inwalidzkich dziecięcych o ramie stałej bazuje również na tradycyjnej postaci geometrycznej – zespawanych profili giętych. Analizując produkty różnych marek dostępne na rynku, można dostrzec tendencję do regulacji niektórych parametrów wózków, np. szerokość czy głębokość siedziska (np. *Invacare Action3 Junior* - Rys. 7a [124]). Ponadto niektórzy projektanci umożliwiają najmłodszym użytkownikom dobór wariantów stylistycznych elementów wózka, takich jak np. kolor ramy (wózek *Zippie Simba* - Rys. 7b [139]).



Rys. 7. Wózki aktywne dla dzieci: a) *Invacare Action Junior* [124], b) *Zippie Simba* [139], c) *Panthera Micro* [134]

Jedynym dostępnym rozwiązaniem wśród tradycyjnych wózków aktywnych przeznaczonym dla najmłodszych dzieci (w wieku 1 – 5 lat) jest wózek *Panthera Micro* (Rys. 7c), który poprzez swoją konstrukcję (rama ze stali chromowo-molibdenowej i tytanu, wysokociśnieniowe koła tylne, jedno koło przednie, mała masa) cechuje się dużą zwrotnością i trwałością [134]. Innym podobnym rozwiązaniem – dla użytkowników w wieku od 2 do 7 lat jest wózek aktywny *Meyra Brix* (Rys. 9 c), który posiada większy zakres regulacji szerokości i głębokości siedziska, a także regulowaną wysokość oparcia. Jego masa własna jest ponad dwukrotnie większa niż masa wózka *Panthera Micro* [132].



Rys. 8. Wózki aktywne dla dzieci firmy GTM: a) Kid [129], b) Junior [128], c) Smyk [130]

Natomiast producent wózków GTM ma w swojej ofercie m.in. trzy modele wózków dziecięcych: wózek młodzieżowy od 7 do 14 lat - *GTM Kid* (Rys. 8a) [129], wózek dla dzieci w wieku od 3 do 10 lat - *GTM Junior* (Rys. 8b) oraz wózek *GTM Smyk* (Rys. 8c) dla najmłodszych użytkowników w wieku od 3 do 7 lat.



Rys. 9. Wózki aktywne dla dzieci: a) Zippie Kidz [135, 129], b) Sagitta Kids SI [136], c) Meyra Brix [132]

Wózek inwalidzki aktywny dziecięcy *Sagitta Kids SI* (Rys. 9 b) posiada najniższą cenę wśród analizowanych przykładów. Wyróżnia się teleskopową konstrukcją ramy oraz wymienną tapicerką i płytą podnóżka [136]. Wózkiem dostępnym głównie na rynku amerykańskim jest model *Zippie Kidz* (Rys. 9 a), który cechuje się dużym zakresem regulacji i przeznaczony jest dla użytkowników już od 1,5 roku życia [135]. Bardziej szczegółowe porównanie parametrów kilku modeli aktywnych wózków dziecięcych przedstawione zostało w tabeli 1. Orientacyjne ceny przedstawione w ostatniej kolumnie aktualne są na rok 2021/22.

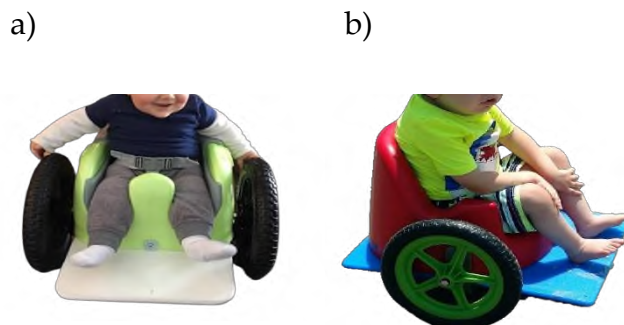


Tab. 1. Porównanie parametrów przykładowych wózków aktywnych dziecięcych [124, 128 - 136, 139]  
gdzie „bd” oznacza: brak danych

Wózek	Rys.	Wiek	Masa własna	Maks. obciążenie	Szerokość siedziska	Cena [PLN]
<b>Invacare Action</b>	29a	3-15 lat	14,5 kg	80 kg	21-38 cm	5 500
<b>Zippie Simba</b>	29b	7-12 lat	8 kg	65 kg	22-36 cm	8 900
<b>Panthera Micro</b>	29c	1-5 lat	3,5 kg	30 kg	24-27 cm	9 000
<b>GTM Kid</b>	30a	7-14 lat	bd	75 kg	30-42 cm	5 700
<b>GTM Junior</b>	30b	3-10 lat	bd	50 kg	24-40 cm	6 000
<b>GTM Smyk</b>	30c	3-7 lat	6 kg	35 kg	24-34 cm	6 000
<b>Zippie Kidz</b>	31a	1,5-12 lat	6,5 kg	65 kg	25-35 cm	9 500
<b>Sagitta Kids</b>	31b	bd-11 lat	9 kg	60 kg	24-34 cm	4 300
<b>Meyra Brix</b>	31c	2-7 lat	8,5 kg	40 kg	18-36 cm	9 500

Omówione wyżej przykłady wózków inwalidzkich dla najmłodszych użytkowników stanowią bardzo mały odsetek wszystkich ofert tego typu pojazdów. Jeszcze rzadziej spotykane są wózki przeznaczone dla dzieci w wieku około 2-3 lat oraz nieco starszych. Ich cena jest niestety zwykle bardzo wysoka i tylko częściowo refundowana przez ubezpieczalnie. Poza przykładami wózków inwalidzkich dziecięcych o tradycyjnej ramie z profili giętych istnieją także na rynku rozwiązania bardziej oryginalne przeznaczone dla dzieci najmłodszych (już nawet od 6. miesiąca życia). Pojazdy te nie wpisują się pod względem konstrukcji w definicję tradycyjnych wózków inwalidzkich, jednakże pełnią podobne funkcje, umożliwiając samodzielność i mobilność najmłodszym pacjentom. Wiele dzieci cierpiących np. na rozszczep kręgosłupa poruszają się, pełzając lub czołgając się po podłodze, co ogranicza miejsce zabaw tylko do powierzchni domowych. Zapotrzebowanie na rynku na pojazdy ułatwiające mobilność najmłodszym jest tak duże, że spora grupa rodziców kierując

się kreatywnością i domowymi sposobami zaczęła tworzyć wózki dla najmłodszych na podstawie typowych siedzisk dla niemowlaków (Rys. 10) [126].



Rys. 10. Bumbas - pojazd z podstawą siedziska Bumbo Chair: a) dla niemowlaków [45], b) dla najmłodszych dzieci [126]

Ponadto na portalach społecznościowych powstały grupy (np. *Bella's Bumabas* [45]) stwarzające rodziców oraz firmy chętne wesprzeć inicjatywę domowych pojazdów dla dzieci z niepełnosprawnościami. Głównym elementem pojazdu jest siedzisko (najczęściej *Bumbo Chair*), które oryginalnie służy jako delikatne podparcie dla niemowlaka (od 3 do 12 miesięcy) w pozycji siedzącej. Standardowe wymiary siedzisk typu *Bumbo Chair* wynoszą: 38,3 x 38,3 x 22,5 cm (szerokość x wysokość x głębokość) [63]. W różnych źródłach można spotkać się także z nazwą własną pojazdu – *Bumbas*, która pochodzi od wspomnianego siedziska. Kreatywność rodziców nie zna granic i często można znaleźć różne rodzaje pojazdów wytworzonych nawet z siedzisk krzesełek do karmienia (Rys. 11). Bazą wózka może być nawet duża deska do krojenia z tworzywa sztucznego (!), do której mocowane są koła rowerowe (najczęściej o średnicy 12" – ok. 30 cm) oraz od spodu – kółka stabilizujące. Koszt wytworzenia tego typu pojazdu wynosi około 150 USD (ok. 600 PLN) i około 4 godziny pracy w warunkach domowych. Pojazd taki dostosowany jest dla niemowląt (w zależności od zastosowanego siedziska) i umożliwia zabawę we wnętrzu domu oraz na zewnątrz. Niemowlęta otrzymują w ten sposób - wraz z pojazdem - pewien stopień samodzielności i nowych możliwości wspólnej zabawy z rówieśnikami czy rodzeństwem.



Rys. 11. Pojazdy budowane przez rodziców w warunkach domowych [126]

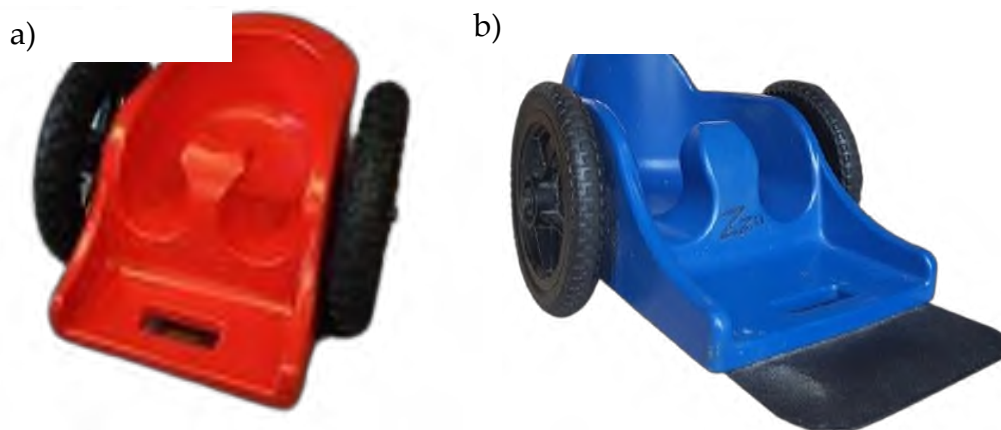
Innym przykładem pojazdu zbudowanego przez rodzica dziecka z niepełnosprawnością ruchową jest pojazd „The GoBro” [100] który dedykowany jest dzieciom w wieku do 4 lat. Cena wózka to ok. 400 USD (ok. 1850 PLN). Wysokość pojazdu to ok 76 - 102 cm w zależności od jego wersji wymiarowej. Masa pojazdu wynosi aż 18 kg.



Rys. 12. Pojazd "The GoBro" [100]

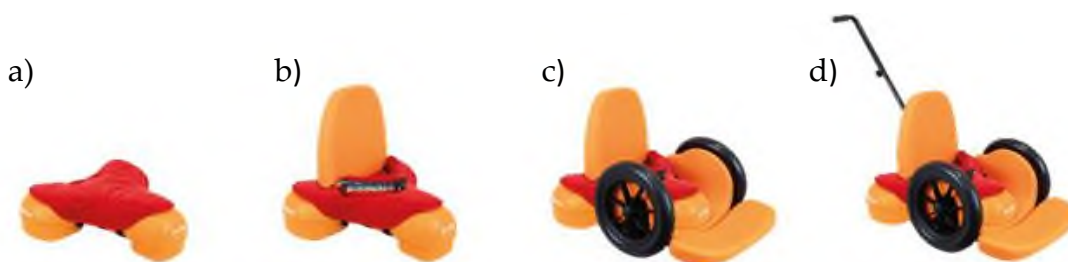
Jednym z oryginalniejszych rozwiązań dostępnych na rynku i przeznaczonych dla dzieci od najmłodszych lat życia jest pojazd *Zip Zac* firmy Zchair LLC [147]. Pierwszy taki wózek powstał na rynku amerykańskim w 2010 r. dla docelowego użytkownika – półtorarocznego pacjenta z rozszczepieniem kręgosłupa. *Zip Zac* jest dostępny w dwóch wersjach wymiarowych (*Zip Zac I*, *Zip Zac II*). *Zip Zac I* (Rys. 13 a) przeznaczony jest dla dzieci w wieku od ok. 9 miesięcy do 2,5 roku. Wewnętrzne wymiary siedziska wynoszą ok. 21,5 x 20 x 13 cm (szerokość x długość x głębokość). Pojazd ma masę ok. 5,9 kg. Natomiast *Zip Zac II* (Rys. 13 b) dedykowany jest pacjentom w wieku od ok. 2,5 roku do 5 lat. Szerokość siedziska wózka *Zip Zac II* wynosi ok. 26,7 cm, długość – ok. 24 cm, głębokość – ok. 22,8 cm, a jego masa wynosi 7,9 kg. Jego konstrukcja bazuje na metalowej ramie, do której przymocowane jest siedzisko, koła (o średnicy 12" czyli ok. 30 cm), a także elementy dodatkowe, np. uchwyt dla opiekuna. Cena wózka *Zip Zac* wynosi 900 USD (ok. 3500 PLN) lub 1100 USD (ok. 4300 PLN) w zależności od konfiguracji. Firma funkcjonuje głównie

na rynku amerykańskim, ale umożliwia także za dodatkową opłatą wysyłkę swoich produktów za granicę [86].



Rys. 13. Pojazd: a) Zip Zac I, b) Zip Zac II [86]

Innym oryginalnym rozwiązaniem dla dzieci z niepełnosprawnością ruchową jest pojazd autorstwa australijskiej firmy FireFly – *Scooot*. Wózek posiada kilka funkcji użytkowych i jest przeznaczony dla najmłodszych dzieci w wieku od ok. 2 do 6 lat (masa dopuszczalna użytkownika – 22 kg). Szerokość siedziska pojazdu wynosi 23 cm, a jego długość 40 cm, ponadto wysuwany podnóżek dostosowany jest do zmiany długości od 52 do 63 cm (miara od siedziska). Oparcie ma szerokość 26 cm, a jego wysokość wynosi 30 cm, dodatkowo do oparcia może być przymocowany pas bezpieczeństwa. Konstrukcja wózka posiada elementy metalowe, które stanowią pewnego rodzaju ramy całego pojazdu oraz pozwalają na modyfikację urządzenia i dołączanie elementów dodatkowych. Ze względu na swoją konstrukcję i elementy dodatkowe pojazd umożliwia dzieciom o różnym stopniu niepełnosprawności poruszanie się za pomocą: pełzania (w pozycji leżącej, przemieszczanie się za pomocą rąk i nóg - Rys. 14 a), odpychania się nogami (Rys. 14 b), jazdy za pomocą odpychania kół rękami (Rys. 14 c). Konstrukcja pozwala także na dołączenie uchwytu do wózka, który może być pchany przez opiekuna (Rys. 14 d). Ponadto *Scooot* wyróżnia się bardzo oryginalnym designem. Koszt wózka wynosi ok. 3 700 PLN [85].



Rys. 14. Pojazd Scooot i jego możliwe modyfikacje: a) Scoot, b) Crawl, c) Ride i d) Poosh [85]

Porównując pojazdy dla najmłodszych można zauważyć, że pojazd *Bumbas* wyróżnia się prostotą konstrukcji oraz łatwością wykonania nawet w warunkach domowych, jednak nie posiada żadnej regulacji wymiarów (ewentualnie konieczna jest wymiana całego siedziska na nowe) i jest tzw. rozwiązaniem „garażowym”, które nie jest w żaden sposób testowane pod względem wytrzymałości konstrukcji czy jej bezpieczeństwa. Pojazd *TheGoBro* jest pojazdem bardziej zaawansowanym niż domowej roboty *Bumbasy*, jednak wśród wszystkich rozwiązań wyróżnia się największą masą własną, co może wpływać na łatwość (trudność) użytkowania wózka. Wózki *Zip Zac* produkowane w dwóch wariantach rozmiarowych wyróżniają się wśród wymienionych rozwiązań najwyższą ceną.

Tab. 2. Porównanie parametrów i cen pojazdów dla najmłodszych użytkowników z niepełnosprawnością ruchową

Wózek	Rys.	Wiek	Masa własna	Maks. obciążenie	Szerokość siedziska	Cena [PLN]
<b>The GoBro</b>	12	9 m-cy - 4 lata	18 kg	80 kg	21-38 cm	1 850
<b>Zip Zac I</b>	13a	9 m-cy – 2,5 lat	5,9 kg	65 kg	21,5 cm	3 500
<b>Zip Zac II</b>	13b	2 – 5 lat	7,9 kg	30 kg	26,7 cm	4 300
<b>Scooot</b>	14	2 – 6 lat	-	22 kg	23 cm	3 700

Rozwiązaniem szczególnie wyróżniającym się pod kątem dizajnu oraz możliwości modyfikacji konstrukcji i przystosowania dla dzieci z różnymi stopniami niepełnosprawności ruchowej jest pojazd *Scoot*. Dla dzieci w pierwszych latach życia oraz w wieku przedszkolnym bardzo ważna jest mobilność, samodzielność w niektórych czynnościach, takich jak dosięganie zabawek na półkach czy podnoszenie ich z podłogi, przemieszczanie się po domu, czy podwórku, placach zabaw itp. Każde z zaproponowanych rozwiązań spełnia wymienione potrzeby użytkowników, a ponadto swoim wyglądem przypomina bardziej zabawkę niż typowy wózek inwalidzki z aluminiową ramą, co jest dodatkowym atutem. Dizajn zorientowany na dzieci z niepełnosprawnościami ruchowymi wpływa pozytywnie na ich psychikę, a także na odbiór otoczenia – innych rówieśników. Istotną cechą tych pojazdów (oraz w niektórych przypadkach wadą) jest ich niewielki prześwit (odległość od podłoża), co uniemożliwia jazdę na niektórych powierzchniach, ale zapewnia

także wiele korzyści, np. większą stabilność i bezpieczeństwo. Ponadto pojazdy typu *Bumbas*, *Zip Zac*, *TheGoBro* czy *Scooot* pełnią rolę przygotowawczą do większych pojazdów – wózków inwalidzkich. Decydując się na zakup tradycyjnego wózka inwalidzkiego trzeba przygotować się na spory wydatek. Często część kosztów refundowana jest przez ubezpieczalnie czy fundacje, jednak generalnie częstotliwość oraz powód zakupu wózka musi być dobrze uargumentowany. W przypadku najmłodszych użytkowników wymiana wózka na większy jest stosunkowo często konieczna – w porównaniu do użytkowników dorosłych, dlatego najbardziej pożądane produkty w tej grupie wiekowej to urządzenia funkcjonalne „rosnące” z użytkownikiem. Analizując istniejące rozwiązania można zauważyć, że najistotniejsze cechy tego typu urządzeń związane są z masą własną pojazdu, regulacją rozmiarów do użytkownika, ceną, dostępnością oraz dizajnem.

Pomimo istniejących na rynku kilku pojazdów przeznaczonych dla najmłodszych użytkowników, celowość wytworzenia nowej optymalnej konstrukcji pojazdu jest uzasadniona m.in. ze względu na:

- zapotrzebowanie rynku na tego typu produkty;
- doskonalenie i unowocześnienie produkowanych pojazdów czy urządzeń rehabilitacyjnych;
- wdrożenie do praktyki produkcyjnej wyników prac naukowo-badawczych z dziedziny projektowania inżynierskiego, technologii addytywnych, optymalizacji topologicznej i nauk pokrewnych (inżynierii rehabilitacyjnej, inżynierii biomedycznej i in.);
- realizacja myśli wynalazczej i konieczność praktycznego sprawdzenia nowych koncepcji konstrukcyjnych (konstrukcje eksperymentalne).

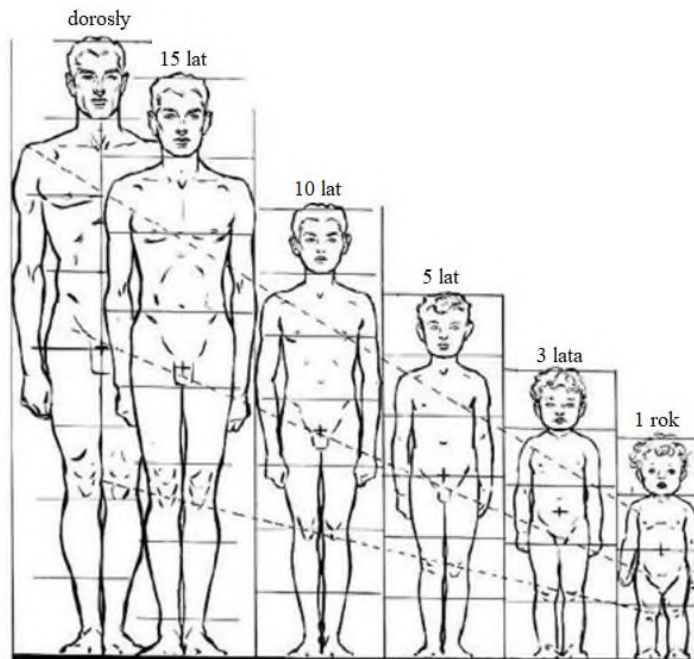
## 2.2. Grupa docelowa

Docelowym użytkownikiem projektowanego pojazdu manualnego jest dziecko z niepełnosprawnością ruchową kończyn dolnych (bądź z tymczasowym urazem/złamaniem kończyn dolnych) w wieku od ok. 9. miesiąca życia – czyli okresie, w którym dziecko najczęściej już posiada umiejętność samodzielnego siedzenia, do ok. 4. roku życia – wieku, w którym dzieci z niepełnosprawnościami ruchowymi przesiadają się już najczęściej na standardowy wózek inwalidzki ze stałą ramą.

Dedykując pojazd najmłodszym użytkownikom przeanalizowane zostały także statystyki dotyczące liczby dzieci cierpiących na różne schorzenia, które potencjalnie mogą potrzebować takiego rozwiązania. Najczęściej niepełnosprawności ruchowe kończyn dolnych u dzieci spowodowane są m.in.

dysfunkcją chodu, opóźnieniem rozwoju motorycznego, wadami wrodzonymi – np. rozszczepieniem kręgosłupa (ang. *Spina Bifida*), chorobami genetycznymi – np. rdzeniowym zanikiem mięśni SMA (ang. *Spinal Muscular Atrophy*), czy łamliwością kości i mózgowym porażeniem dziecięcym oraz dzieci cierpiące na spastyczność, która jest symptomem wielu chorób i schorzeń (m.in. stwardnienia rozsianego SM (łac. *sclerosis multiplex*), urazu rdzenia kręgowego czy udaru mózgu). Według danych z raportu z Bazy Danych Polskiego Rejestru Wrodzonych Wad Rozwojowych (PRWWR) dotyczących urodzenia w Polsce w latach 2002-2019 dzieci z wadami wrodzonymi wynika, że w 2020 r. urodziło się 82 dzieci z rozszczepem kręgosłupa. Można zatem przyjąć, że w Polsce rodzi się obecnie ok. 100 dzieci rocznie z tą wadą [104]. Szacuje się, że obecnie w naszym kraju żyje około 1000 osób chorych na SMA, a co roku rodzi się około 45–55 dzieci, u których w pewnym momencie życia pojawia się rdzeniowy zanik mięśni; statystycznie 30–40 z nich jest narażone na ostrą postać SMA [105]. Stowarzyszenie Osób z Wrodzoną Łamliwością Kości podaje, że choroba występuje raz na 30-60 tys. urodzeń (do odniesienia: wg danych Głównego Urzędu Statystycznego w roku 2020 w Polsce zanotowano 356 540 urodzeń [19]). Ponadto istnieje też grupa potencjalnych użytkowników krótkoterminowych projektowanego urządzenia, czyli m.in. dzieci, które uległy urazowi typu: zwicnięcie, skręcenie czy złamanie nogi. Według przeanalizowanych statystyk można założyć, że roczne zapotrzebowanie na tego typu urządzenie rehabilitacyjne w samej Polsce może stanowić minimalnie ok. 150-200 sztuk, co uzasadnia celowość podjętego tematu. Wiele dzieci z niepełnosprawnościami ruchowymi, takimi jak np. rozszczepienie kręgosłupa porusza się czołgając po podłodze, co znacznie ogranicza sposób oraz miejsce ich zabaw tylko do powierzchni mieszkaniowych. Odpowiednio dostosowany wózek powinien więc zapewnić najmłodszym pacjentom pewien stopień samodzielności i możliwości wspólnej zabawy z rówieśnikami czy rodzeństwem w domu, żłobku czy przedszkolu oraz – w ograniczonym zakresie - na zewnątrz.

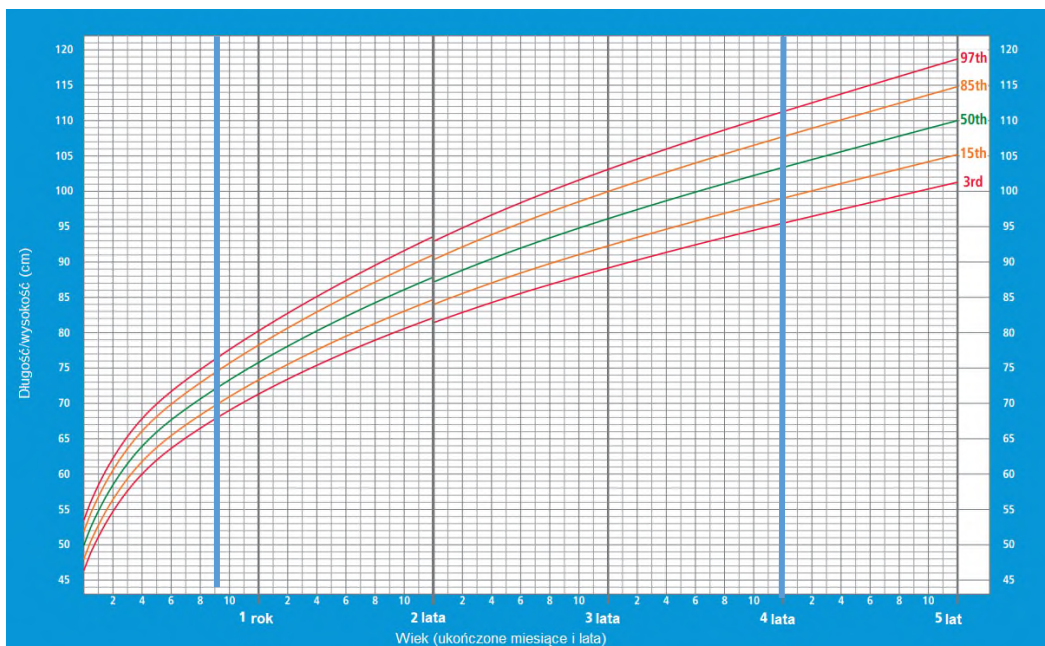
Istotnym elementem projektowania wózka inwalidzkiego dla dzieci jest uwzględnienie - innych niż dla człowieka dorosłego – proporcji części ciała oraz ich zmian, które są charakterystyczne dla pierwszych lat życia (Rys. 15) [43, 119, 123, 53].



Rys. 15. Zmiany proporcji ciała człowieka [12]

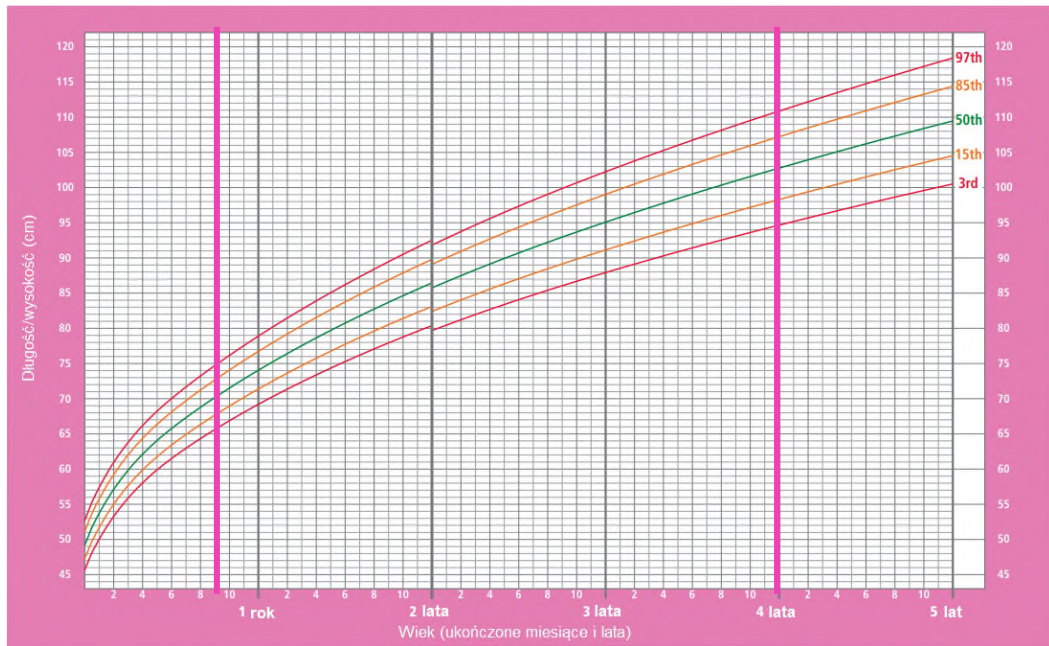
Zmiana proporcji ciała ma bardzo duży wpływ na ergonomię użytkownika wózka, który powinien stosownie „rosnąć” wraz z użytkownikiem [52, 55]. Konstrukcja projektowanego wózka powinna być więc dostosowana do wymiarów, wzrostu, masy i proporcji ciała dzieci (dziewczyń i chłopców) z zakresu wieku do ok. 4 lat. Istotne przy projektowaniu wózka jest uwzględnienie skrajnych wymiarów użytkownika z danej grupy wiekowej, czyli 3. i 97. centyla (Rys. 16 i Rys. 17).

a)



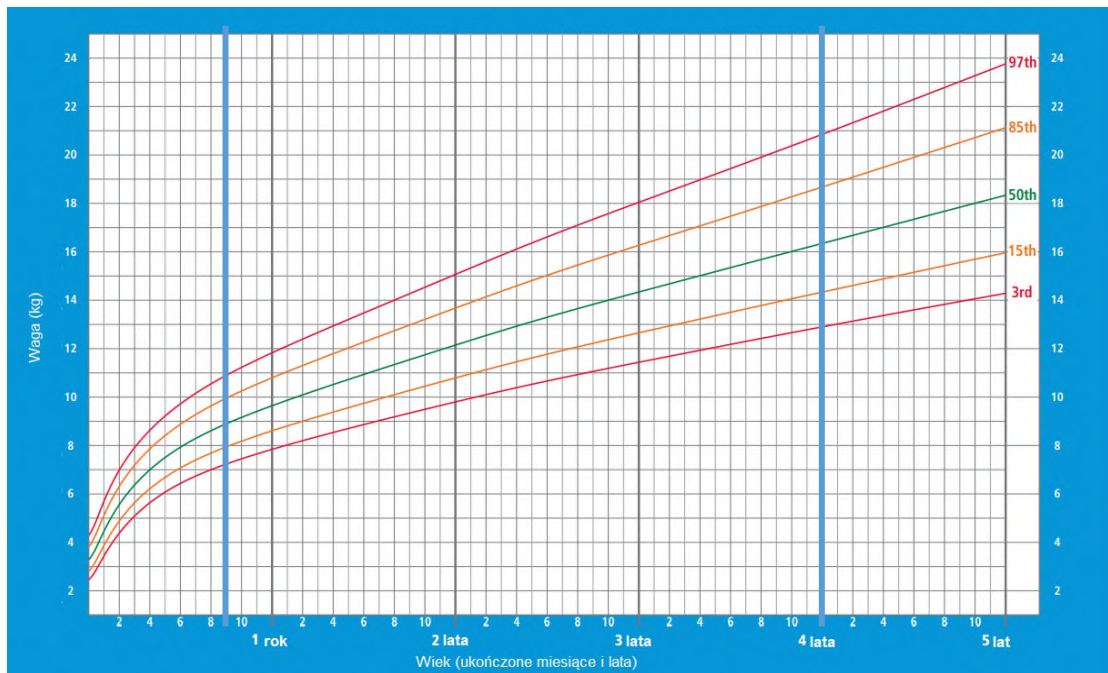


b)

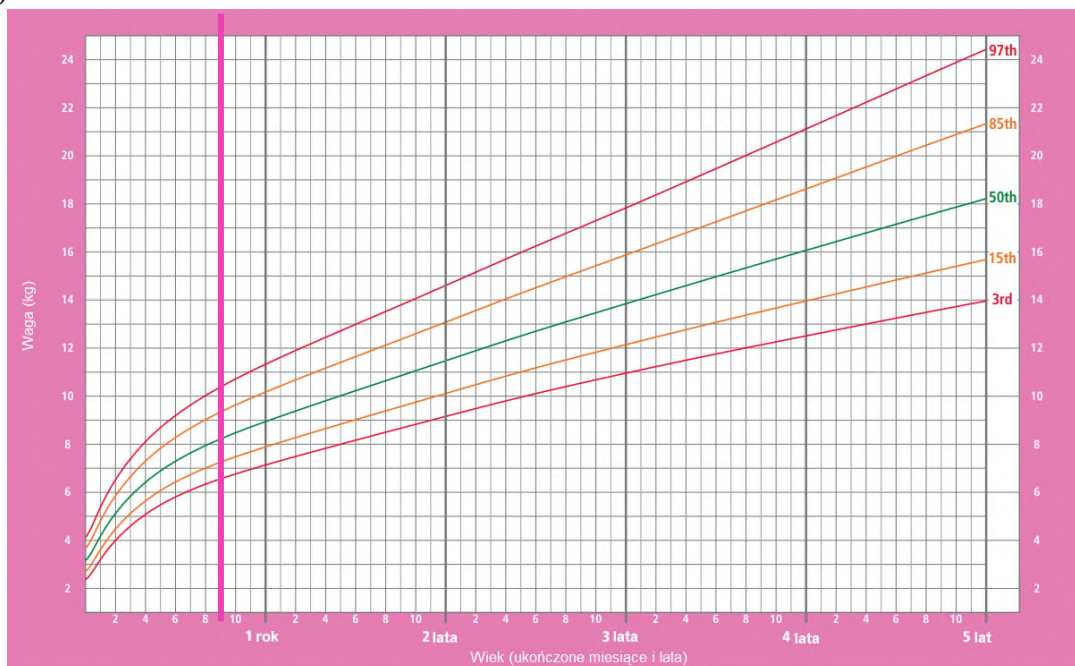


Rys. 16. Siatki centylowe: a) wzrost chłopców, b) wzrost dziewczyn w wieku do 5 lat [115]

a)



b)



Rys. 17. Siatki centylowe - masa ciała dzieci w wieku do 5 lat: a) chłopcy, b) dziewczynki [115]

Według danych WHO (ang. *World Health Organization* – Światowa Organizacja Zdrowia) zawartych w siatkach centylowych utworzona została tabela (Tab. 3) z danymi dotyczącymi masy i wzrostu użytkowników docelowych w wybranej grupie wiekowej od 9. do 48. miesiący. Przedstawione dane mają znaczny wpływ na postać geometryczną, wymiary oraz wytrzymałość projektowanego wózka.

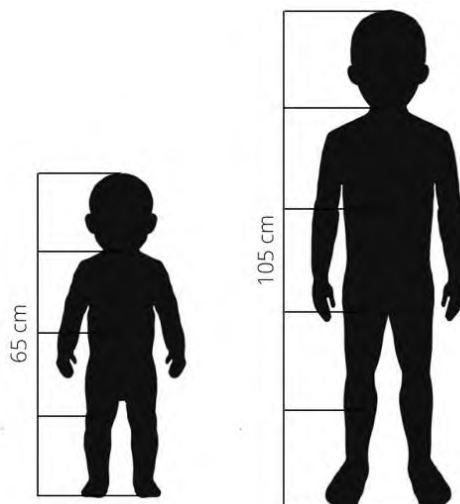
Tab. 3. Wzrost i masa dzieci w wieku do 4 lat – na podstawie siatek centylowych (3. i 97. centyl) [115]

Wiek	Dziewczynki		Chłopcy	
	Waga [kg]	Wzrost	Waga [kg]	Wzrost [cm]
<b>9 m-cy – 2 lata</b>	6,5-11,3	65-78,9	7,2-11,8	68-80,2
<b>2 – 3 lata</b>	7,1-14,6	69,2-92,5	7,8-15,1	71,3-93,6
<b>3 – 4 lata</b>	9,2-17,8	80,3-102,2	9,8-18,0	82,1-103,1

Na podstawie analizy danych antropometrycznych oraz siatek centylowych przyjęte zostały skrajne parametry użytkowników, dla których przeznaczony będzie projektowany pojazd. Skrajne wymiary użytkownika przyjęte do projektowania dotyczą przede wszystkim wzrostu i wagi (Rys. 18). Dlatego

też w koncepcji wózka przeznaczonego dla dzieci szczególnie uwzględniona będzie:

- regulacja dostosowana do zmieniającego się wzrostu użytkownika za pomocą np. regulacji długości podnóżka,
- wytrzymałość na obciążenia związane z użytkowaniem wózka przez dziecko o maksymalnej masie 20 kg.



Rys. 18. Przedział wzrostu dla skrajnego wieku oraz skrajnych centyli użytkowników docelowych

### 2.3. Optymalizacja konstrukcji

Jedne z najistotniejszych cech użytkowych pojazdów rehabilitacyjnych to ich wytrzymałość oraz masa własna, która wpływa bezpośrednio na komfort i łatwość użytkowania tego typu urządzeń przez użytkowników oraz umożliwia transportowanie czy przenoszenie pojazdów przez osoby trzecie. W kontekście projektowanego pojazdu manualnego dla dzieci w wieku do lat 4, jednym z najważniejszych kryteriów związanym z procesem projektowo-konstrukcyjnym jest dążenie do minimalizacji masy końcowej przy zachowaniu odpowiedniej wytrzymałości całej konstrukcji. W tym celu zdecydowano o podjęciu próby zoptymalizowania konstrukcji przy pomocy dostępnych metod, m.in. optymalizacji topologicznej.

**Optymalizacja** to dziedzina nauki zajmująca się metodami wyboru najlepszych z określonego punktu widzenia rozwiązań, spośród grupy rozwiązań spełniających stawiane im wymagania i spełniające dane kryteria. W sensie matematycznym jest to proces poszukiwania ekstremum pewnej funkcji będącej matematycznym opisem badanych zjawisk, zwanej funkcją celu  $f(x)$ , kryterium bądź wskaźnikiem jakości. Wybór spośród otrzymanej grupy rozwiązań rozwiązania najlepszego, zależy od celu i wymagań zawartych w sformułowaniu problemu. Rozwiązanie, które spełnia zarówno warunki

zagadnienia jak i postawione wymagania nazywa się rozwiązaniem optymalnym. Ograniczeniami nazywa się zbiór wszystkich warunków oddziałujących na rozpatrywane zagadnienie w taki sposób, iż wyznaczają obszar dopuszczalny jej rozwiązania [16, 89, 118].

Poszukiwany jest wektor  $x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix}$  będący minimum funkcji  $f(x)$

pod warunkiem:

$$\begin{cases} g_i(x) \leq 0, & i = 1, 2, \dots, m \\ l_j(x) = 0, & j = 1, 2, \dots, p \end{cases}$$

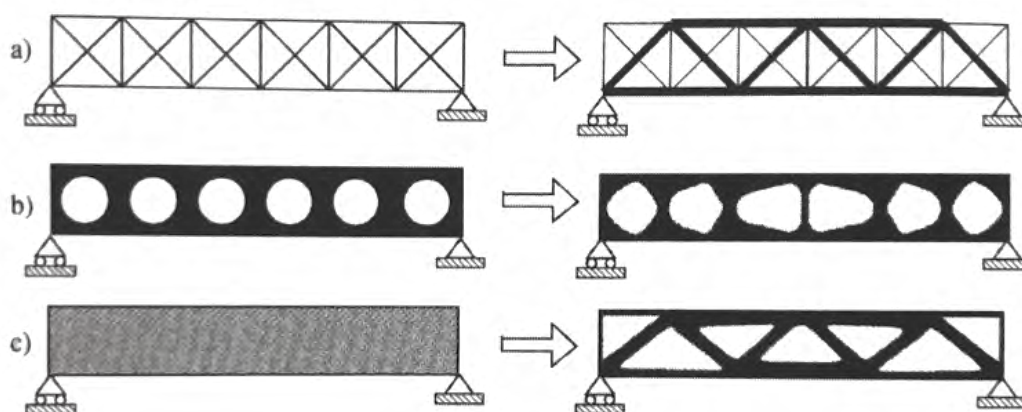
gdzie  $g(x)$  oraz  $l(x)$  oznaczają odpowiednio nierównościowe i równościowe ograniczenia konstrukcyjne. Liczba zmiennych  $n$  oraz liczba ograniczeń  $m$  i/lub  $p$  nie musi być powiązana ze sobą. Problem optymalizacji określony w powyższych równaniach nazywany jest problemem optymalizacji z ograniczeniami.

Jedną z metod optymalizacji, która pełni znaczącą rolę w procesie projektowo-konstrukcyjnym jest optymalizacja. Ten rodzaj podejścia w inżynierii sprawdza się szczególnie tam, gdzie konieczne staje się zmniejszenie masy danego wytworu, zmniejszanie ilości materiałów wejściowych do jego produkcji, a przy tym obniżenia ceny produktu oraz kosztów eksploatacyjnych. Obniżenie masy danego elementu wymaga równocześnie zwiększenia (lub przynajmniej zachowania) jego parametrów wytrzymałościowych, a wszystko to przy zachowaniu nadanych już cech konstrukcyjnych, ale ze zmianami ich wartości (np. zmian liczby i/lub wielkości otworów). Rolą inżynierów w tym procesie jest zaproponowanie konfiguracji stanowiącej kompromis pomiędzy najlżejszą strukturą danego elementu, a technologicznie najłatwiejszą do wykonania – z jednoczesnym uwzględnieniem norm i procedur bezpieczeństwa [10, 107].

Ze względu na sposób modyfikacji parametrów konstrukcyjnych w optymalizacji strukturalnej wyróżnia się [9]:

- optymalizację rozmiaru (głównie dotyczy konstrukcji prętowych) (Rys. 19a) - w której zmiennymi konstrukcyjnymi są określone parametry istniejącej struktury, podlegające modyfikacji, takie jak: średnica przekroju poprzecznego pręta czy grubość płyty;
- optymalizację kształtu (Rys. 19b) – w której zmiennymi są parametry geometryczne struktury, zmianie podlegają więc wymiary decydujące o kształcie otworów w strukturze, ich liczba pozostaje niezmienna,

- optymalizację topologii (Rys. 19c) - w metodzie tej na podstawie układu sił i utwierdzeń, a także założonej objętości struktury wynikowej, poszukiwana jest właściwa (optymalna) dystrybucja tworzywa, która uwzględnia liczbę, położenie i kształt zalecanych otworów oraz obszarów, które nie mogą zostać usunięte lub zoptymalizowane.



Rys. 19. Optymalizacja strukturalna: a) optymalizacja rozmiaru, b) optymalizacja kształtu, c) optymalizacja topologii [9]

Przy opisie Rys. Rys. 19c pojawiło się pojęcie optymalizacji topologii. W odróżnieniu od optymalizacji struktury – pozwala ona na dość dowolną dystrybucję tworzywa w określonej przestrzeni projektowej tak, aby nadać konstruowanemu obiektowi pożądane cechy (w tym np. cechy wytrzymałościowe). Proces optymalizacji polega więc na poszukiwaniu maksymalnej bądź minimalnej wartości – wspomnianej już - funkcji, bądź funkcjonau celu przy równoczesnym spełnieniu pewnej liczby warunków ograniczających [9, 71].

**Optymalizacja topologiczna** (ang. *topology optimization*) wyznaczyła nowy kierunek w procesie projektowo-konstrukcyjnym. W połączeniu optymalizacji topologicznej ze współcześnie szybko rozwijającymi się przyrostowymi technologiami wytwarzania powstał szereg możliwości nadawania nowych postaci konstrukcyjnych znanym, ale i nowym wytworom. Optymalizacja topologiczna daje m.in. odpowiedź na pytanie o sposób rozmieszczenia w założonej przez konstruktora przestrzeni tworzywa niezbędnego do spełnienia przez konstruowany wytwór jego funkcji celu. I to tak, aby przy zadanych warunkach brzegowych i dla zadanego obciążenia postać konstrukcji była optymalna (ze względu na przyjęty zbiór kryteriów).

Optymalizacja topologiczna jest dziedziną wiedzy stosunkowo młodą, ale bardzo szybko rozwijającą się, szczególnie od lat 90. ubiegłego wieku. Ma ona

bardzo duże zastosowanie praktyczne, a jej rozwój wynika z potrzeb niektórych gałęzi nowoczesnego przemysłu. Zastosowania optymalizacji topologicznej można rozpatrywać zarówno w skali makro (w budownictwie oraz w przemyśle biomedycznym [56, 79, 84], motoryzacyjnym [78] i lotniczym) [41, 47, 69, 70, 90, 102] jak i w skali mikro (konstrukcje stosowane jako mikromechanizmy) [109, 145].

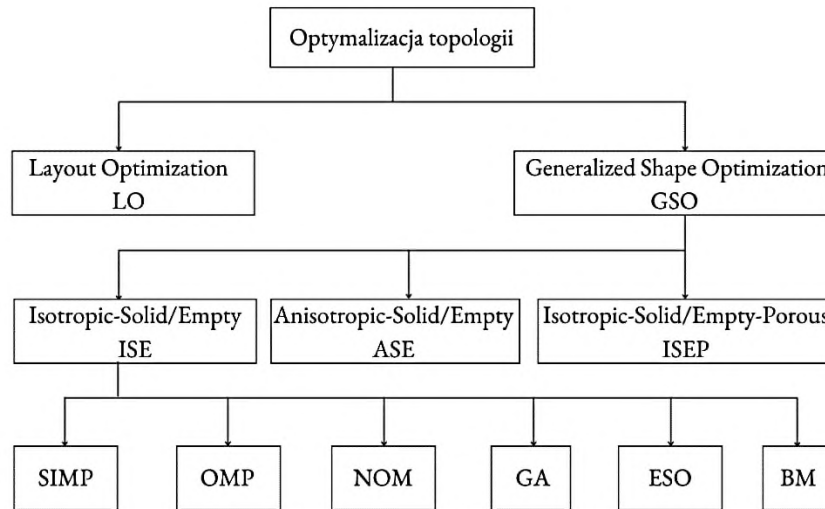
Wyróżnia się kilka rodzajów optymalizacji topologicznej różniących się przede wszystkim sposobem formułowania funkcji celu i metodami prowadzącymi do uzyskania rozwiązania (Rys. 20). Optymalizacja topologiczna dzieli się na dwie zasadnicze dziedziny [9, 70]:

- metoda LO (ang. *Layout Optimization*) – dotyczy konstrukcji prętowych. Głównym problemem jest tu wyznaczenie optymalnej siatki prętów stanowiących połączenia węzłów siatki. Zazwyczaj rozpatrywane są trzy następujące po sobie problemy:
  - optymalny wybór przestrzennej konfiguracji prętów i ich połączeń,
  - optymalizacja geometrii (określenie najlepszej lokalizacji węzłów),
  - optymalizacja przekrojów poprzecznych prętów;
- metoda GSO (ang. *Generalized Shape Optimization*) – dotyczy optymalizacji topologii kontinuum materialnego (struktury ciągłej), które może być jednorodne lub zawierać kilka składników (kompozyt). Do ciał jednorodnych zalicza się również ciała porowate. Optymalizacja dokonywana jest wewnątrz ściśle określonego obszaru projektowego, gdzie podczas procesu optymalizacji tworzą się podobszary wypełnione tworzywem i podobszary pozbawione materiału (zmieniają się granice tych podobszarów).

Rozwiązywanym problemem w ramach optymalizacji topologicznej jest wypełnianie tzw. przestrzeni projektowej tworzywem, co jednocześnie powoduje efekt powstawania pustych obszarów. W procedurze poszukiwania najlepszego rozwiązania w sposób ciągły zmieniają się granice pomiędzy tymi obszarami. Metody GSO stosuje się zazwyczaj, jeśli istnieje duża ilość tworzywa wypełniającego (podczas, gdy metody LO, gdy jest go niewiele) oraz gdy tworzywo jest ciągłe (inna nazwa: optymalizacja kontinuum materialnego). Ponadto metodę GSO można podzielić na optymalizację topologiczną [9]:

- ciał izotropowych (ang. *IsotropicSolid/Empty – ISE*) - ciał bezpostaciowych o właściwościach jednakowych we wszystkich kierunkach;
- ciał anizotropowych (ang. *Anisotropic-Solid/Empty – ASE*);

- porowatych ciał izotropowych (ang. *Isotropic-Solid/Empty/Porous – ISEP*).



Rys. 20. Klasyfikacja optymalizacji topologicznej [9]

Jedną z metod optymalizacji topologicznej ciał izotropowych jest metoda SIMP (ang. *Solid Isotropic Microstructure with Penalization*). Podczas tego procesu powstaje pewne sztuczne, fikcyjne tworzywo, którego gęstość przyjmuje wartości z zakresu między zerem, a wartością początkową. Metoda wymaga zdefiniowania sposobu interpolacji właściwości tworzywowych w odpowiednich węzłach modelu oraz ustalenia progu wartości gęstości tworzywa fikcyjnego służącej decyzji o wypełnieniu lub niewypełnieniu obszaru tym tworzywem. Rozwiązanie w metodzie zależy od wartości potęgi funkcji służącej do interpolacji wartości odpowiedniej właściwości fikcyjnego tworzywa. Wartość ta nazywana jest parametrem kary lub penalizacji. Po raz pierwszy metoda SIMP została zastosowana w 1989 r. przez Bendsoe [9]. W kolejnych latach doskonalono sposób sformułowania wartości właściwości optymalizowanej struktury oraz wpływ wykładnika potęgi funkcji aktualizacji.

Jako jeden z rodzajów SIMP można określić metodę ATO (ang. *Adaptive Topology Optimization*), która polega na adaptowaniu siatki podziału w trakcie procesu i jednoczesnym wygładzaniu kształtów struktury [9].

Inną metodą interpolacji właściwości tworzywa podczas optymalizacji jest metoda RAMP (ang. *Rational Approximation of Material Properties*). Jest to aproksymacja właściwości tworzywa za pomocą funkcji wymiernych. Można ją podobnie jak metodę SIMP, zastosować do aproksymacji właściwości materiału [9, 70].

Kolejnym rodzajem metod GSO jest OMP (ang. *Optimal Microstructure with Penalization*). W metodzie tej optymalizuje się mikrostrukturę i z tego

powodu zwiększa się liczba niewiadomych niezależnych parametrów (np. w 2D istnieją trzy niezależne parametry: dwie grubości oraz kierunek zorientowania mikrostruktury) [70].

Metoda NOM (ang. *Near Optimal Microstructure*) jest rodzajem optymalizacji topologicznej, w której w większości nie stosuje się parametru penalizacji, ale z tego powodu rozwiązanie może nie być zbieżne. W tym przypadku, aby tego uniknąć stosowane jest postępowanie zastępujące zwykłą penalizację, czyli tzw. penalizację o ustalonym poziomie. Prowadzi to do zwiększenia zbieżności rozwiązania. Pozytywnym aspektem metody jest implementacja z mniejszą liczbą niezależnych parametrów dla każdego elementu niż w metodzie OMP [70].

Kolejnym rodzajem metod używanych w optymalizacji topologicznej są algorytmy genetyczne (ang. *Genetic Algorithms*). Sposób działania algorytmów genetycznych oparty jest na biologicznym pojęciu replikacji łańcuchów DNA. Podstawowe cechy algorytmów to: prowadzenie poszukiwań rozwiązań w wielu punktach, zakodowana postać parametrów zadania optymalizacji, reguły ewolucyjno-probabilistyczne stosowane do wyboru i tworzenia nowych rozwiązań, wykorzystanie do poszukiwań łatwo obliczalnej wartości funkcji celu, uniwersalność i prostota implementacyjna [70].

Wśród głównych metod generowania form znajduje się metoda optymalizacji topologicznej ESO (ang. *Evolutionary Structural Optimization*), opracowana przez Y.M. Xie i G.P. Stevena w 1993 roku [143] oraz jej zmodyfikowana wersja, znana jako BESO (*Bi-directional Evolutionary Structural Optimization*), opublikowana w 2006 [48]. Metoda ESO funkcjonuje również pod nazwą SERA (ang. *Sequential Element Rejections and Admissions*). Jest to metoda oparta na prostej koncepcji stopniowego usuwania nieefektywnego tworzywa ze struktury w trakcie jej projektowania. Wyniki wykazują, iż nie zawsze prowadzi ona do uzyskania rozwiązania optymalnego. Tak więc dotychczas SERA jest metodą raczej intuicyjną, dla której nie ma dowodów istnienia rozwiązania optymalnego [70].

Metoda bąbelkowa - BM (ang. *Bubble Method*) polega na iteracyjnym umieszczaniu otworów (bąbelków) w optymalizowanej geometrii. Funkcja celu polega na określeniu najlepszego wektora określającego położenie otworu. Jest to metoda będąca przykładem tzw. geometrycznego opisu problemu optymalizacji topologii [70].



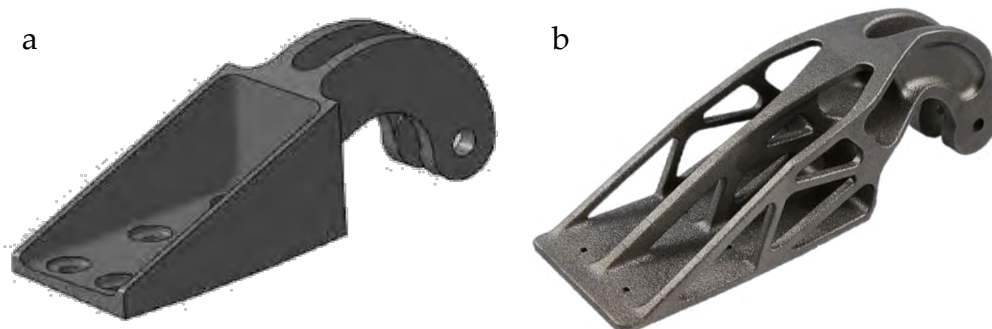
Jak już wspomniano, optymalizacja topologiczna ma przede wszystkim za zadanie zmniejszenie masy elementów poprzez automatyczne usuwanie tworzywa, które nie jest niezbędne w objętości modelu do przenoszenia obciążeń danego elementu lub całego układu, podczas gdy konstrukcja spełnia założone wymagania projektowe i kryteria. Postać obiektu będąca wynikiem zastosowanej optymalizacji topologicznej zwykle ma charakter teoretyczny i wymaga dalszych działań w celu uzyskania poprawnej postaci konstrukcyjnej, ergonomicznej, wzorniczej, ale również technologicznej. Optymalizacja topologiczna odgrywa znaczącą rolę przede wszystkim w procesie projektowania obiektów technicznych przemysłu lotniczego i motoryzacyjnego, ale jej udział rośnie także w projektach architektonicznych oraz w zagadnieniach wzornictwa. Przykłady jej zastosowań omówiono w dalszej części pracy.

### **2.3.1. Optymalizacja topologiczna w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym**

Kwestia minimalizacji masy w przemyśle lotniczym oraz motoryzacyjnym jest szczególnie istotna, ponieważ przekłada się na znaczące korzyści ekonomiczne (np. niższe zużycie paliwa), użytkowe (np. zwiększenie zasięgu pojazdu) a nawet ekologiczne (m.in. redukcja emisji dwutlenku węgla), dlatego w tych sektorach przemysłu można dostrzec liczne przykłady zastosowania optymalizacji topologicznej.

Światowy lider w branży lotniczej i obronnej - EADS Innovation Works - przedstawił projekt, którego celem było zademonstrowanie możliwości wytworzenia w technologii DMLS wspornika zawiasu gondoli samolotu Airbus A320, o zredukowanej masie, przy jednoczesnym zachowaniu identycznej wytrzymałości, jak w przypadku elementu konwencjonalnego, co osiągnięto przez zastosowanie optymalizacji topologicznej. Zastosowana przez EADS Innovation Works optymalizacja topologiczna przy użyciu oprogramowania OptiStruct polegała na dwuetapowym procesie projektowania [88]:

- 1) przetestowanie wytrzymałości modelu wirtualnego wspornika (Rys. 21a) w wybranych warunkach; analizę wyników w programie CATIA v5; ulepszenie konstrukcji w programie HyperMorph; optymalizacja kształtu oraz rozmiarów konstrukcji w oprogramowaniu Altair OptiStruct;
- 2) powtórzenie procesu optymalizacji przy nowych ograniczeniach, które wynikały z pierwszego cyklu projektowania. Masa zoptymalizowanego wspornika wynosiła 326 g.



Rys. 21. Wspornik zawiasu gondoli samolotu Airbus 320: a) tradycyjny, b) zoptymalizowany [88]

Wykonany w technologii DMLS wspornik o zoptymalizowanej konstrukcji (Rys. 21b) z tytanu został porównany ze wspornikiem odlewany tradycyjnie ze stali. Masa zoptymalizowanego wspornika zawiasu gondoli samolotu Airbus A320 wynosiła 326 g, co w porównaniu z masą oryginalnego elementu (918 g), oznaczało redukcję masy o 64%. Zoptymalizowany wspornik zachował ponadto te same właściwości wytrzymałościowe, przy jednoczesnym zmniejszeniu wartości naprężeń. Zastosowanie zoptymalizowanych wsporników zawiasów gondoli może zmniejszyć masę samolotu nawet o około 10 kg, co w przemyśle lotniczym ma bardzo duże znaczenie. Dodatkowo, w porównaniu technologii DMLS z konwencjonalną metodą odlewania, emisja CO<sub>2</sub> została zmniejszona o prawie 40%, a zużycie materiału zmniejszyło się o 25% [88, 146].

Jednym z popularnych przykładów zastosowania optymalizacji topologicznej w przemyśle motoryzacyjnym jest rama motocykla *Light Rider* (Rys. 22) zaprojektowana w niemieckiej filii firmy Airbus – APWorks [81, 83]. Rama pojazdu wytworzona została ze stopu aluminium za pomocą technologii addytywnych. Koszt wytworzenia tego typu ramy za pomocą technologii generatywnych szacowany jest współcześnie na ok. 56 000 USD (ok. 220 000 PLN) [82]. Oryginalna forma ramy jest wynikiem zastosowania optymalizacji topologicznej z użyciem systemu Altair OptiStruct [81].



Rys. 22. Elektryczny motocykl "Light Rider" [83]

### 2.3.2. Optymalizacja topologiczna konstrukcji architektonicznych

Ze względu na potencjał generowania form o dużej nośności i oryginalnej geometrii, optymalizacja topologiczna jest szeroko stosowana w projektach architektonicznych. W historii architektury pojawia się ścisły związek między rozwojem tradycyjnych form architektonicznych, a ewolucją tzw. form strukturalnych. Wraz z szybkim rozwojem metod obliczeniowych, w architekturze powstał nowy trend związany z generowaniem formy wspomagany przez oprogramowania komputerowe, a realizowanym przez iteracyjne procesy algorytmiczne oparte na MES. Wśród głównych metod generowania form znajduje się metoda optymalizacji topologicznej ESO oraz jej zmodyfikowana wersja, znana jako BESO. Obie wymienione metody optymalizacji topologicznej są obecnie szeroko stosowane w praktykach architektonicznych, a ich popularność wciąż rośnie przede wszystkim ze względu na rozwijające się sposoby wytwarzania zoptymalizowanych konstrukcji architektonicznych za pomocą technologii addytywnych [5, 6, 73]. Często prezentowane projekty architektoniczne ze zoptymalizowaną formą strukturalną to pawilony wystawowe takie jak np. X-Form 1.0 Pavilion (Rys. 24) autorstwa australijsko-chińskich naukowców Nica Bao i Xin Yana [6].



Rys. 23. Kolejne etapy optymalizacji konstrukcji pawilonu X-Form 1.0 [5]

Forma pawilonu została zoptymalizowana za pomocą metody BESO (Rys. 23), a następnie jej prototyp został wytworzony za pomocą technologii generatywnych ze szkła akrylowego (PMMA) w ośmiu częściach.



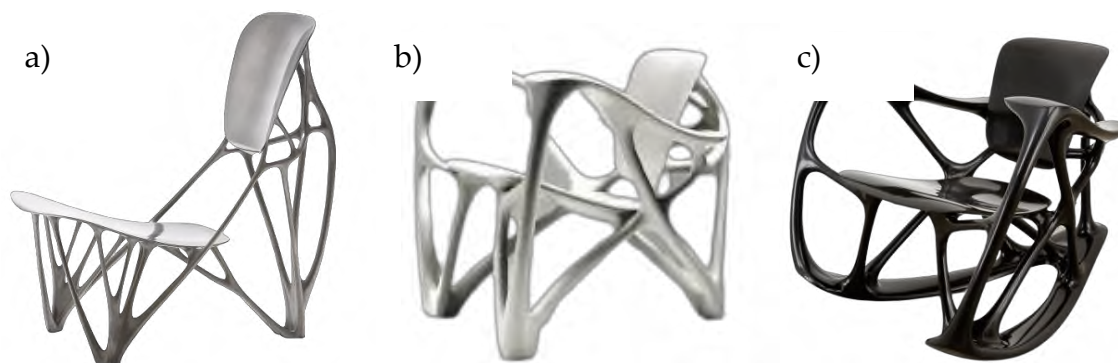
Rys. 24. Pawilon X-Form 1.0 - akrylowy prototyp [5]

Prototyp eksperymentalny pawilonu X-Form 1.0 nie zawiera żadnych połączeń śrubowych, ani klejonych, a poszczególne elementy zostały zaprojektowane i złożone ze sobą za pomocą połączeń wciskowych [5].

### 2.3.3. Optymalizacja topologiczna we wzornictwie przemysłowym

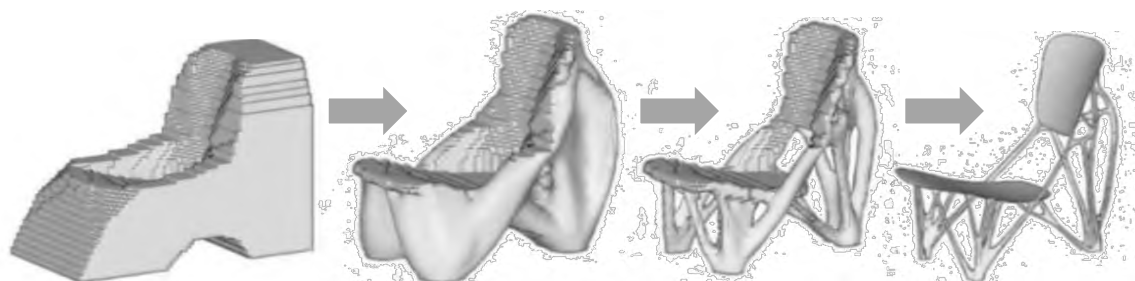
Wzornictwo przemysłowe skupia się na projektowaniu przedmiotów użytkowych, które są wynikiem połączenia innowacyjnych rozwiązań technologicznych, ergonomii oraz oryginalnego dizajnu, dlatego szczególnie w nowoczesnych projektach użytkowych często można dostrzec zastosowanie procedur optymalizacji topologicznej.

Holenderski dizajner Joris Laarman jest znany ze swoich eksperymentalnych projektów inspirowanych nowymi technologiami. Wśród swoich prac ma sporo projektów związanych z optymalizacją topologiczną, m.in. krzesła Bone Chair (Rys. 25a), Bone Armchair (Rys. 25b) oraz Bone Rocket Chair (Rys. 25c). Artysta często podkreśla wpływ mechanizmów rządzących naturą (np. struktury kości czy drzew) na rozwój nowych technologii i swojej twórczości [68].



Rys. 25. Projekty Jorisa Laarmana: a) Bone Chair, b) Bone Armchair, c) Bone Rocket Chair [68]

Projekt krzesła Bone Chair sięga 1998 roku, kiedy niemiecka spółka Adam Opel GmbH (we współpracy z profesorem Lotharem Harzheimem) opracowała nowe oprogramowanie do obrazowania i symulacji z zamiarem wytworzenia wydajniejszego mocowania silnika. Celem oprogramowania było zoptymalizowanie mocowania silnika samochodowego poprzez usunięcie zbędnego tworzywa przy jednoczesnym zapewnieniu optymalnej wytrzymałości. Cały proces zaczynał się od utworzenia wirtualnego trójwymiarowego modelu mocowania i symulację naprężeń oraz sił przyłożonych do określonych punktów obiektu. Następnie algorytm usuwał tworzywo z obszarów nieobciążonych tak, aby nie obniżyć wytrzymałości elementu. Oprogramowanie zainspirowało artystę – Jorisa Laarmana do skonstruowania krzesła przy użyciu tego algorytmu jako zaawansowanego technologicznie narzędzia do „rzeźbienia cyfrowego” (Rys. 26).



Rys. 26. Etapy generowania kształtu krzesła Bone Chair [68]

W przypadku krzesła Bone Chair wynik wygenerowany komputerowo musiał zostać dopracowany pod kątem specyfikacji tworzywa – aluminium. Prototyp krzesła został wytworzony za pomocą technologii odlewniczych.

Innym przykładem zastosowania optymalizacji topologicznej w typowym wzornictwie przemysłowym jest m.in. bioniczna rama hulajnoży (Rys. 27) opracowana przez czeskich inżynierów z laboratorium technologii addytywnych ProtoLab pod opieką profesora Marka Pagáča z uczelni technicznej Vysoká Škola Báňská w czeskiej Ostrawie [50, 51, 54].

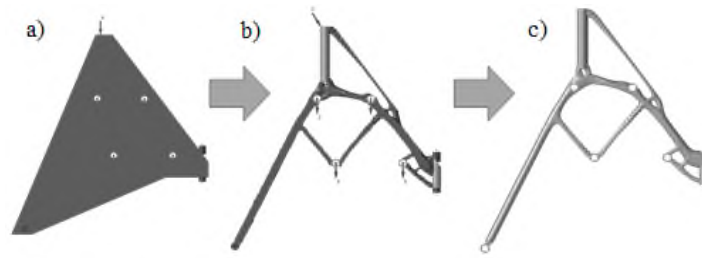


Rys. 27. Zoptymalizowana topologicznie rama hulajnoży wytworzona za pomocą technologii SLM [75]

Inżynierowie wykorzystali wspólnie popularne oprogramowanie Altair Inspire do zoptymalizowania ramy w taki sposób, aby osiągnęła ona minimalną masę z równoczesnym zapewnieniem pożądaných właściwości wytrzymałościowych. Zoptymalizowana rama ma masę ok. 3,2 kg co w porównaniu do wyrobów dostępnych na rynku stanowi redukcję masy o 25%. Zoptymalizowana topologicznie rama hulajnoży została wytworzona za pomocą technologii SLM (ang. *Selective Laser Melting*) [50, 49].

#### 2.3.4. Optymalizacja topologiczna w inżynierii rehabilitacyjnej

Przykładem możliwości zastosowania algorytmów optymalizacji topologicznej w procesie projektowo-konstrukcyjnym urządzeń rehabilitacyjnych jest opracowany przez autorkę przykład optymalizacji podpórki czterochołowej. Wstępny model wirtualny uproszczonej ramy podpórki (Rys. 28a) został opracowany w środowisku Autodesk Inventor, a następnie zoptymalizowany za pomocą oprogramowania Altair Inspire. Ostateczna postać konstrukcyjna podpórki (Rys. 28c) różni się w niewielkim stopniu od postaci zoptymalizowanej wygenerowanej przez oprogramowanie (Rys. 28b), ponieważ modele powstałe w wyniku optymalizacji są modelami dyskretnymi i wymagają dalszych działań w celu wygenerowania formy bryłowej lub powierzchniowej.



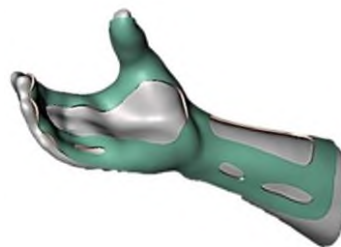
Rys. 28. Etapy optymalizacji topologicznej: a) model wejściowy; b) model dyskretny; c) model bryłowy [77]

W wyniku optymalizacji topologicznej samej ramy podpórki zredukowano jej masę do 2,8 kg, co dało bardzo dobry wynik wejściowy do dalszych działań projektowych (np. optymalizacji siedziska itp.). Końcowa postać geometryczna podpórki prezentowała bardzo oryginalny kształt, nawiązujący do kształtów organicznych (Rys. 29).



Rys. 29. Model wirtualny zoptymalizowanej podpórki czterokołowej [77]

Innym przykładem zastosowania optymalizacji topologicznej w inżynierii rehabilitacyjnej jest zoptymalizowany model szyny przeznaczonej do wsparcia lub unieruchomienia kończyny górnej (Rys. 30) opracowany przez brazylijski zespół naukowców pod przewodnictwem Paulo Reisa [106].



Rys. 30. Model wirtualny zoptymalizowanej szyny do unieruchamiania kończyny górnej [106]

W przeprowadzonych badaniach zespół zaproponował wytworzenie szyny przedramienia za pomocą technologii przyrostowych przy zastosowaniu tworzywa sztucznego – nylonu (Rys. 31a). Ponadto szyna została porównana z tradycyjną szyną termoformowaną z polipropylenu (Rys. 31b), a wyniki tego porównania wykazały, że m.in. szyna zoptymalizowana miała mniejszą masę, a także koszt jej wytworzenia był niższy niż szyny termoformowanej.



Rys. 31. Szyna: a) zoptymalizowana i wytworzona za pomocą druku 3D, b) tradycyjna wytworzona z tworzywa termoplastycznego [106]

Postać geometryczna szyny zoptymalizowanej wpłynęła także na komfort użytkowania pod kątem zmiany temperatury, która w przypadku zabudowanej szyny termoformowanej jest utrudniona i wywołuje pocenie się skóry na całej powierzchni kontaktu z wytworem.

Fenomen optymalizacji topologicznej polega na tym, że jako proces, optymalizacja topologiczna wykorzystuje algorytmy, które inspirowane są procesami i mechanizmami obecnymi w naturze, przez co wynikowe postacie geometryczne konstrukcji zoptymalizowanych w kontekście wizualnym i stylistycznym można określić jako biomorficzne. Wynikłe z optymalizacji topologicznej oryginalne postaci geometryczne są dodatkową zaletą wizualną, jednak w dużej mierze zależą od docelowej technologii wytwarzania konstrukcji zoptymalizowanych topologicznie. Optymalizacja topologiczna w kontekście projektowanego pojazdu manualnego ma na celu przede wszystkim wyznaczenie optymalnej dystrybucji tworzywa wypełnienia modeli wraz z próbą minimalizacji masy końcowej konstrukcji przy zachowaniu jej wytrzymałości.

## **2.4. Technologie użyteczne do wytwarzania obiektów o konstrukcjach zoptymalizowanych topologicznie**

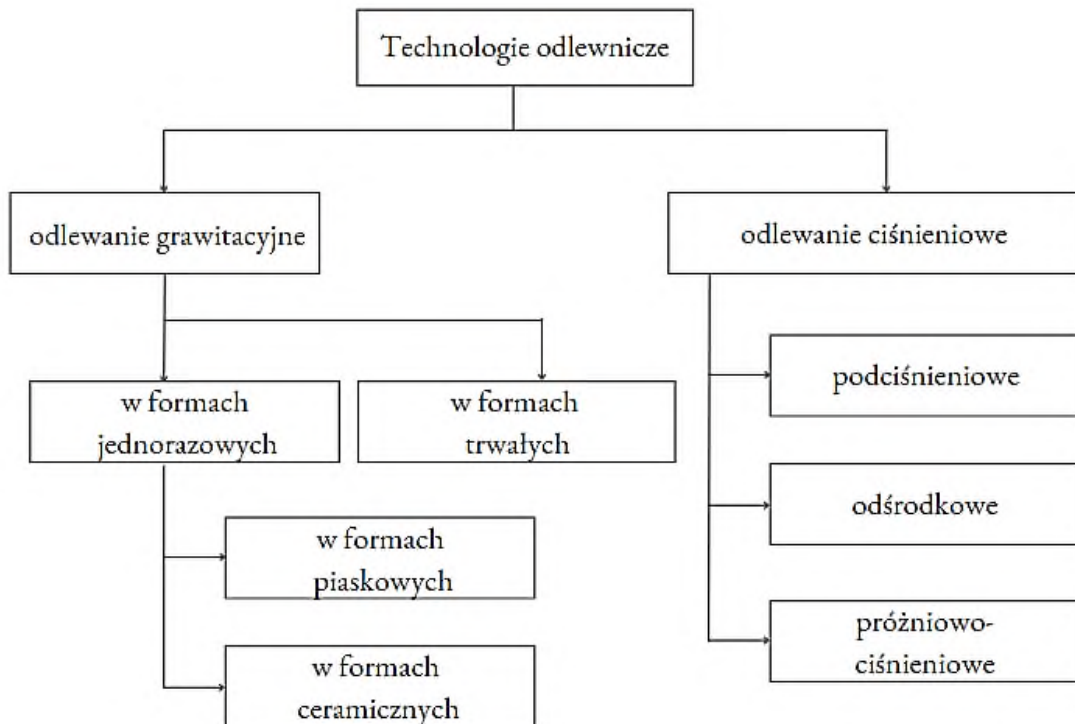
Ważnym aspektem projektowania i konstruowania jest tzw. technologiczność, czyli zespół cech konstrukcyjnych określonego przedmiotu umożliwiających jego wytworzenie w danych warunkach produkcyjnych. Obiekty o konstrukcjach zoptymalizowanych topologicznie można wytwarzać za pomocą różnych technologii. Jednak ze względu na ich nietechnologiczne (a więc zwykle bardzo skomplikowane) kształty, najbardziej



nadające się do zastosowania są: technologie odlewnicze i technologie addytywne (przyrostowe).

#### 2.4.1. Odlewanie elementów o konstrukcjach zoptymalizowanych topologicznie

Odlewnictwo jest jedną z podstawowych i najstarszych technologii wytwarzania. Technologie odlewnicze obejmują szereg różnych procesów, których podział przedstawiony został na Rys. 32.

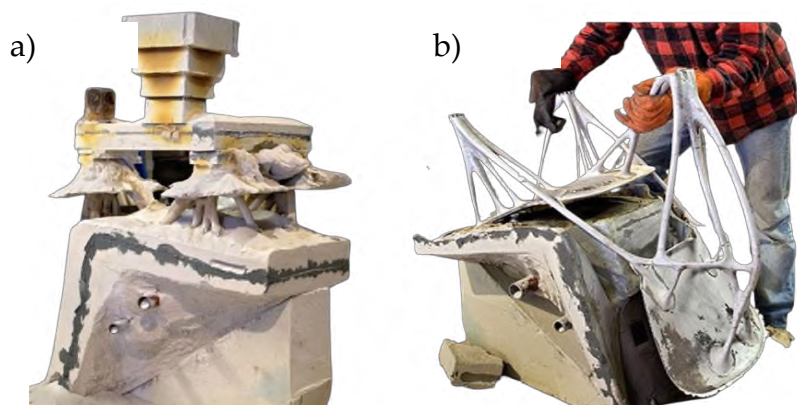


Rys. 32. Podział technologii odlewniczych [112]

Bardzo istotnym czynnikiem w przypadku wytwarzania obiektów o złożonym, w tym np. organicznym kształcie jest dobór odpowiedniej technologii. Rozważając zaś konieczność podziału całości wytworu na elementy składowe, a następnie ich wytwarzanie za pomocą odlewania i spawania - niesie to ze sobą wysokie ryzyko pojawienia się wad łączenia czy uwidocznionych miejsc spawania. Dobrym rozwiązaniem jest odlewanie obiektu w jednym elemencie ze szczególnym uwzględnieniem zapobiegania wad odlewniczych – szczególnie powierzchniowych (porów). Jednakże, w przypadku dużych gabarytowo odlewów trzeba odpowiednio dostosować cały proces odlewania.

Przykładem odlewu wytworzonego jako jeden element jest krzesło *Bone Chair* (patrz: podr. 2.3.3) Poprzez zastosowanie drukowanych form odlewniczych krzesło zostało odlane w jednym elemencie (Rys. 33 a, b), a następnie

wypiaskowane i wypolerowane, co wpłynęło na pożądany wizualny efekt końcowy [68].



Rys. 33. Wytwarzanie krzesła Bone Chair: a) forma odlewnicza, b) usuwanie odlewu z formy [68]

#### 2.4.2. Generatywne technologie wytwarzania konstrukcji zoptymalizowanych

Jedną z nowoczesnych technologii wytwarzania, której rozwój ma szczególny wpływ na możliwości wytwarzania obiektów o postaciach zoptymalizowanych topologicznie jest wytwarzanie generatywne (ang. *generative manufacturing*, *additive manufacturing*), zwane również wytwarzaniem addytywnym czy wręcz potocznie - drukiem 3D. Epoka tworzyw sztucznych przyniosła projektantom większą swobodę projektowania, a rozwój druku 3D, który rozpoczął się w latach 80. ubiegłego wieku umożliwił wytwarzanie obiektów o zupełnie nowych złożonych formach.

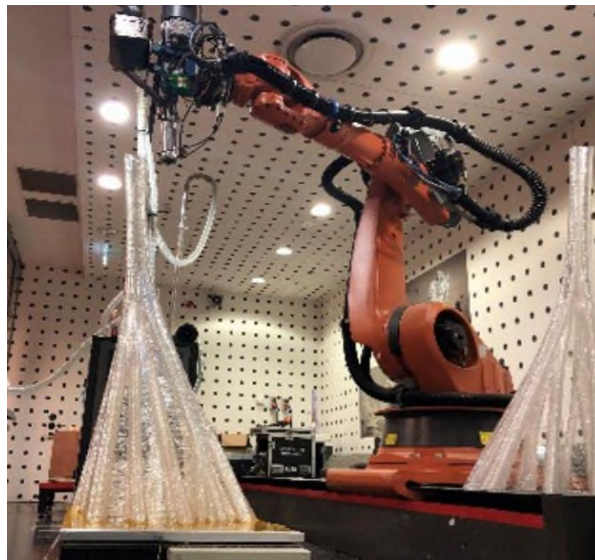
Technologie addytywne w większości przypadków nie zastępują technologii konwencjonalnych, ale stanowią zupełnie nową jakość wytwarzania wytworów, szczególnie tych o postaciach geometrycznych dotychczas niemożliwych do uzyskania. Technologie generatywne różnią się od technologii konwencjonalnych przede wszystkim dużą elastycznością w wytwarzaniu i stosunkowo niskimi kosztami produkcji elementów o skomplikowanych kształtach, a także małą ilością materiału odpadowego (podpór) [26, 44, 80, 111, 122].

Na wytwarzanie generatywne składa się wiele technologii, które można podzielić ze względu na sposób wytwarzania lub postać czy rodzaj materiału (Rys. 34).



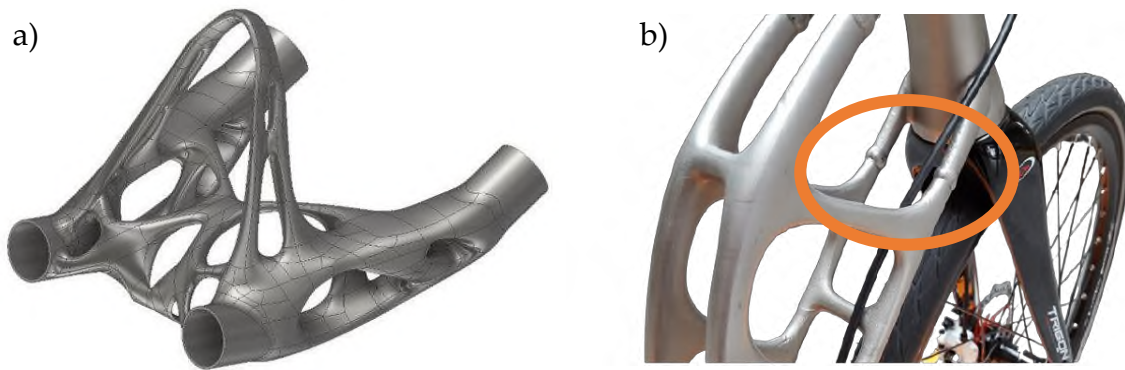
Rys. 34. Podział technologii generatywnych [26]

Przykładem obiektu wytworzonego z tworzyw sztucznych za pomocą technologii addytywnych opisanym w podrozdziale 2.3.1 jest prototyp Pawilon X-Form 1.0 (zastosowano tu technologię FDM z tworzywa PMMA) (Rys. 35).



Rys. 35. Wytwarzanie prototypu Pawilonu X-Form 1.0 za pomocą technologii druku 3D

Innym przykładem wspomnianym w podrozdziale 2.3.3 jest hulajnoga z ostrawskiej uczelni VSB-TUO. Jej rama została podzielona na cztery części (Rys. 36a) odpowiednio dostosowane do przestrzeni roboczej drukarki, a następnie wydrukowane za pomocą technologii selektywnego stapiania laserowego SLM proszku metalowego stali nierdzewnej 316L. Poszczególne części zostały następnie zespawane (Rys. 36b). Druk 3D umożliwił wytworzenie elementów cienkościennych, co dodatkowo wpłynęło na możliwość redukcji masy.



Rys. 36. Fragmentacja modelu na części składowe: a) przykładowy model bryłowy jednej części, b) widoczne miejsca połączenia części drukowanych [54]

Kolejnym przykładem „wydrukowanego” obiektu o konstrukcji zoptymalizowanej topologicznie opisanym w podrozdziale 2.3.1 jest rama motocyklu *Light Rider*, która również została technologicznie podzielona (w tym przypadku aż na 14 części), a następnie wytworzona za pomocą technologii SLM. Wszystkie wytworzone części zostały ze sobą zespawane (Rys. 37) [82].

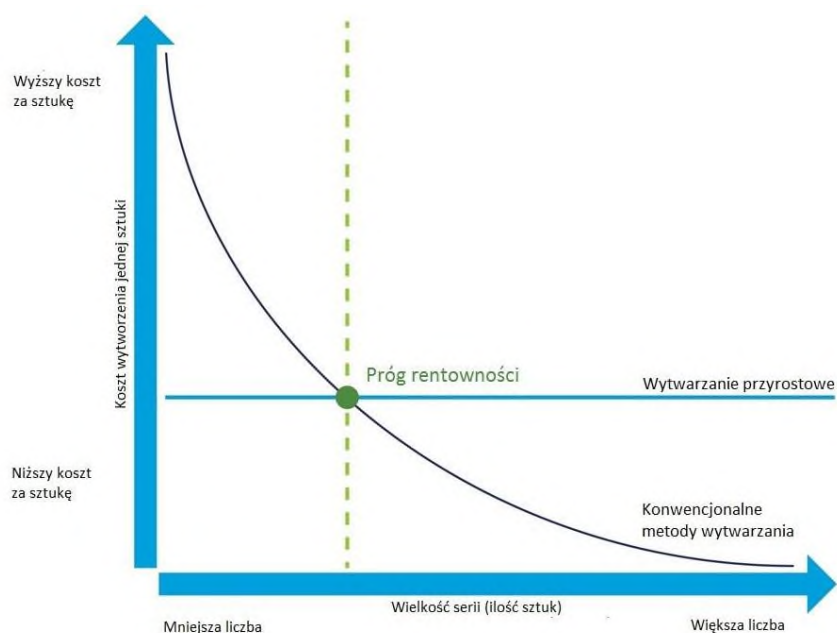


Rys. 37. Widoczne miejsca spawania wydrukowanych części ramy aluminiowej [82]

Wykorzystując technologie wytwarzania przyrostowego takie jak np. selektywne stapianie laserowe SLM, można wytwarzać m.in. elementy z tworzyw metalowych, które - przy bardzo złożonej postaci geometrycznej – są odpowiednio wytrzymałe mechanicznie.

Zasadność wyboru technologii addytywnych jako metody wytwarzania zależy w dużej mierze od wielkości serii i opłacalności produkcji. Ogólna zasada opłacalności stosowania technologii addytywnych dotyczy postaci geometrycznej wytwarzanych obiektów: im bardziej skomplikowany kształt, tym bardziej opłaca się wytworzyć go za pomocą technologii druku 3D w porównaniu do technologii konwencjonalnych. Ponadto próg rentowności

wytwarzania przyrostowego jest uzależniony od wielkości serii. Najczęściej technologie addytywne wykorzystywane są do wytwarzania prototypów oraz produkcji jednostkowej i małoseryjnej, ponieważ koszt wytworzenia pojedynczego elementu jest stały, natomiast w przypadku konwencjonalnych technologii wytwarzania (np. odlewanie metali, obróbka skrawaniem czy wtryskiwanie i wytłaczanie tworzyw sztucznych) szacunkowy koszt wytworzenia pojedynczych egzemplarzy jest stosunkowo wysoki, a maleje wraz ze wzrostem wielkości serii, co związane jest m.in. z kosztem wytworzenia wielorazowych form czy wymiany narzędzi itp. (Rys. 38).



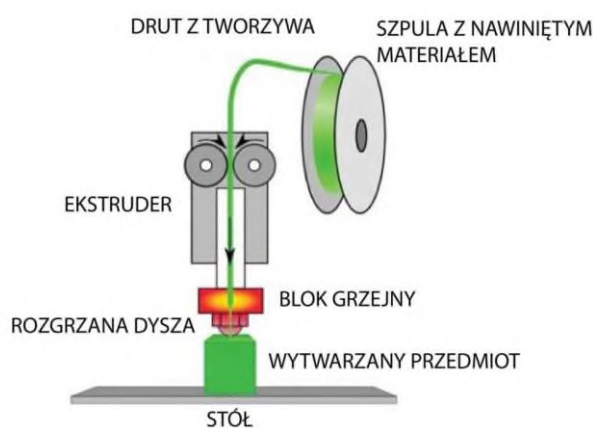
Rys. 38. Krzywa opłacalności druku 3D w porównaniu do technologii konwencjonalnych [15]

Ponadto istotnym czynnikiem wpływającym na koszt wytwarzania elementów z użyciem technologii generatywnych jest ich rosnąca dostępność i popularność. Często podstawowe urządzenia przeznaczone do druku w technologii FDM są dostępne u osób prywatnych w gospodarstwach domowych czy małych firmach, a nawet szkołach podstawowych i średnich. Ponadto istnieją duże przedsiębiorstwa świadczące usługi w zakresie szerokiej oferty różnych technologii addytywnych włącznie z doradztwem technologicznym oraz doбором odpowiedniego materiału odpowiadającego na potrzeby klienta.

Ze względu na wymienione powyżej czynniki oraz dostęp do urządzeń drukujących w technologii FDM w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej uzasadnionym wyborem technologii wytwarzania prototypu pojazdu dla dzieci jest technologia addytywna - FDM.

### 2.4.2.1. Technologia FDM

Technologia FDM (ang. *Fused Deposition Material*), zwana również FFF (ang. *Fused Filament Fabrication*) należy do grupy technologii addytywnych, których cechą charakterystyczną jest wytłaczanie uplastycznionego materiału z głowicy drukujących. Drukowane elementy powstają poprzez osadzanie na stole roboczym kolejnych warstw uplastycznionego drutu z tworzywa termoplastycznego. Kinematyka urządzeń drukujących opiera się najczęściej na kartezjańskim układzie współrzędnych. Ruchy części mechanicznych drukarki (czyli głowicy drukującej i stołu) odbywają się wzdłuż osi w kartezjańskim układzie współrzędnych: Y (w przód i w tył), X (w lewo i w prawo) oraz Z (w górę i w dół). Uproszczony schemat działania urządzenia FDM przedstawiono na Rys. 39.



Rys. 39. Schemat działania urządzenia FDM [110]

Za twórcę technologii FDM uznawana jest firma Stratasys®, która od początku lat 90-tych inwestuje w jej rozwój. Technologia FDM wykorzystywana była początkowo do wytwarzania relatywnie tanich prototypów jednak obecnie stosowana jest do wytwarzania wysokiej jakości prototypów funkcjonalnych oraz końcowych produktów z szerokiej gamy tworzyw termoplastycznych. Najczęściej używanymi filamentami w technologii FDM są:

- PLA (polilaktyd) - termoplastyczny polimer pochodzenia używany najczęściej do prototypowania, drukowania zabawek, gadżetów i biżuterii. W warunkach normalnych i temperaturze pokojowej elementy wytworzone z PLA mogą przetrwać ok. 12-18 lat zachowując swoje właściwości. Wpływ na degradację tego materiału ma przede wszystkim: wilgotność otoczenia, ekspozycja na promieniowanie ultrafioletowe, temperatura otoczenia (zalecana 10 – 40°C). PLA podczas drukowania wykazuje dobrą adhezję do podłoża i nie wymaga podgrzewanego stołu drukarki [151, 140, 36].

- ABS (akrylonitrylo-butadieno-styren) – stosunkowo wytrzymałe tworzywo sztuczne, które służy m.in. do produkcji wszelkiego rodzaju obudów, przycisków, uchwytów i innych. ABS cechuje wysoka twardość, odporność na uderzenia i ścieranie oraz dobra tolerancja wysokich temperatur. Nie jest jednak odporny na promieniowanie ultrafioletowe, krusząc po długim czasie wystawienia na światło słoneczne. Wady filamentu ABS to m.in. brak odporności na rozpuszczalniki (aceton) oraz duży skurcz materiału podczas druku, dlatego - aby temu zapobiec – temperatura druku powinna być dość wysoka (ok. 230 - 260°C), a stół roboczy powinien być podgrzewany (80 - 110°C).
- PET-G (politereftalan etylenu z dodatkiem glikolu) – tworzywo sztuczne, które posiada cechy zarówno ABS i PLA i stosowane jest głównie do wytwarzania pojemników, uchwytów, zasuwek, prototypów, elementów dekoracyjnych np. wazonów. PET-G wykazuje dobrą przyczepność warstw oraz jest stosunkowo wytrzymały oraz elastyczny. Materiał można szlifować i wiercić w nim otwory. Jest odporny na działanie chemikaliów, w tym rozpuszczalników oraz względnie odporny na działanie promieniowania ultrafioletowego i wilgoci. Maksymalna temperatura użytkowa przedmiotów wykonanych z PET-G to około 70°C – wystawione na wyższe temperatury mogą zacząć mięknąć. Podczas druku 3D cechuje się niewielkim skurczem materiału, więc chociaż wskazane jest używanie podgrzewanego stołu, aby zapobiec odklejaniu się wydruków, możliwe jest drukowanie na urządzeniu niewyposażonym w zamkniętą komorę roboczą. Wśród innych zalet często wymienia się też bardzo dobrą dokładność wymiarową wydruków.

Porównanie własności trzech wymienionych filamentów według danych literaturowych [1, 18, 35, 144] przedstawione jest w tabeli Tab. 4.

Tab. 4. Porównanie własności filamentów PLA, ABS i PET-G

Filament	PLA	ABS	PET-G
<b>Temp. Druku [°C]</b>	190-210	230-260	230-250
<b>Gęstość [g/cm<sup>3</sup>]</b>	1,25	1,04	1,23
<b>Moduł Younga [GPa]</b>	2,5-3,6	1,6-1,8	2-3

<b>Granica plastyczności [MPa]</b>	48-68	30-40	45-65
<b>Wytrzymałość na zginanie [MPa]</b>	97	66	90
<b>Wydłużenie przy granicy plastyczności [%]</b>	2,9-6	4,8-7	4-6,4
<b>Zdatność do recyklingu</b>	✓	✓	✓
<b>Biodegradowalność</b>	✓	✗	✗
<b>Toksyczność przy druku</b>	✗	✓	✗
<b>Cena brutto [PLN/kg]</b>	Ok. 75	Ok. 93	Ok. 89

Porównując właściwości filamentów PLA, ABS oraz PET-G i wybierając docelowy materiał do wytworzenia funkcjonalnego prototypu pojazdu szczególna uwaga została zwrócona na czynniki takie jak:

- wytrzymałość materiału,
- toksyczność przy wytwarzaniu / użytkowaniu,
- cena.

Na podstawie wyżej wymienionych kryteriów wyboru - optymalnym wyborem materiału docelowego do wydruku prototypu pojazdu jest filament wytworzony z PLA - przede wszystkim ze względu na najniższą cenę oraz niską toksyczność przy druku. Właściwości fizyczne PLA różnią się w pewnym zakresie między sobą w zależności od producenta filamentu. W tabeli Tab. 5. zestawione zostały dane techniczne PLA przedstawione przez kilka różnych producentów.

Tab. 5. Właściwości filamentu PLA różnych producentów [59-60]

Producent	Prusa	Ultimaker	Nebula	Rosa
<b>Temp. Druku [°C]</b>	190-220	200-210	190-220	195-225
<b>Gęstość [g/cm<sup>3</sup>]</b>	1,24	1,24	1,24	1,25

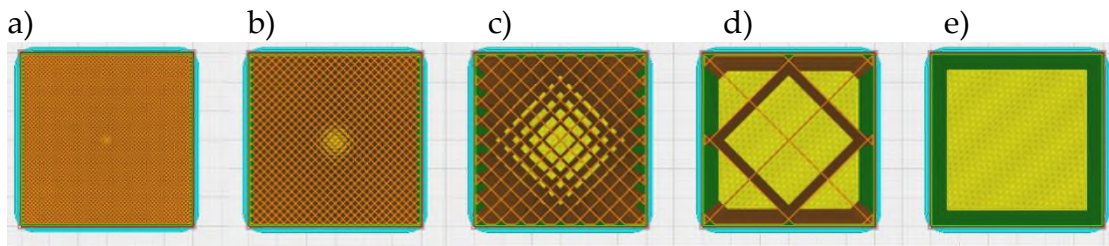


<b>Moduł Younga [GPa]</b>	2,3	2,3	3,6	3,5
<b>Granica plastyczności [MPa]</b>	51	49,5	53	53
<b>Wytrzymałość na zginanie [MPa]</b>	83	103	83	-
<b>Wydłużenie przy granicy plastyczności [%]</b>	2,9	3,3	6	6

Na rzeczywiste właściwości obiektów wykonanych z PLA mogą mieć wpływ m.in.: warunki druku, geometria danego wydruku, warunki otoczenia itd. Każdy z producentów filamentu zastrzega sobie w klauzuli informacyjnej wyłączenie z odpowiedzialności za uszczerbek na zdrowiu, straty materialne bądź inne związane z użytkowaniem ich produktów, zaznaczając, że dane mają charakter wyłącznie informacyjny.

W technologii FDM bardzo istotną kwestią jest dobór odpowiednich parametrów procesu wytwarzania, orientacja elementu na stole drukarki (niższa wytrzymałość wzdłuż osi Z – pomiędzy kolejnymi warstwami), grubości ścianki oraz wypełnienia wytwarzanego elementu. Grubość ścianki oraz wypełnienie (ang. *infill*) mają znaczący wpływ na wytrzymałość, strukturę oraz masę końcową wytwarzanego elementu. Przy wyborze wypełnienia szczególnie ważne są dwa aspekty: wzór wypełnienia (ang. *infill pattern*) oraz gęstość wypełnienia (ang. *infill density*). Głównym zadaniem wypełnienia jest podparcie górnych warstw drukowanego modelu, które w innym przypadku musiałyby być mostami wytwarzanymi nad pustą przestrzenią.




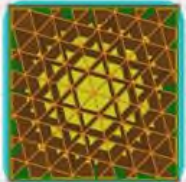
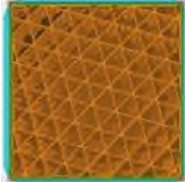



Gęstość wypełnienia (Rys. 40) można zazwyczaj zmieniać w zakresie od zera (wydruk skorupowy) do stu procent (wydruk pełny). Parametr ten podawany jest najczęściej w procentach i określa stosunek objętości wypełnienia do całkowitej objętości komponentu. Na przykład, jeśli gęstość wypełnienia wynosi 20%, oznacza to, że tylko 20% objętości komponentu zostanie wypełnione materiałem, podczas gdy pozostałe 80% będzie puste. Z kolei gęstość wypełnienia wynosząca 100% oznacza, że cała objętość komponentu zostanie wypełniona materiałem (tzw. model pełny). Gęstość wypełnienia ma wpływ m.in. na masę końcową elementu, czas drukowania, zużycie materiału (a zatem i na cenę końcową), a także na wytrzymałość elementu. Standardowa gęstość wypełnienia sugerowana przez oprogramowanie współpracujące z urządzeniami drukującymi (tzw. *slicer*) wynosi najczęściej 20%.



Rys. 40. Gęstość wypełnienia wydruku siatką standardową (ang. *grid*): a) 100%, b) 50%, c) 20%, d) 5%, e) 0%

Wzór wypełnienia to struktura i kształt materiału wewnątrz wytwarzanego elementu - począwszy od prostych linii po bardziej złożone kształty geometryczne. Wzory wypełnień mają również wpływ na wytrzymałość elementu, jego masę końcową, czas wytwarzania, a nawet elastyczność. W zależności od oprogramowania współpracującego z drukarką 3D istnieje wiele różnych wzorów wypełnienia. Analizując przykłady wypełnienia [11, 17], można podzielić je na kategorie zależne od przeznaczenia i funkcji obiektu docelowego (Tab. 6).

Tab. 6. Podział wzorów wypełnienia ze względu na przeznaczenie wydruków

Funkcja	Wzór wypełnienia	
Elementy nie przenoszące obciążeń	 Linie	 Zygzak
Elementy standardowe (prototypy)	 Siatka	 Trójkąty
Elementy przenoszące obciążenia w 3 kierunkach	 Sześciany	 Gyroid
Elementy elastyczne	 Koncentryczny	 Krzyżowy

- Linie (ang. *lines*): wypełnienie liniowe składa się z wielu równoległych linii, które co warstwę drukowane są w kierunku obróconym o  $90^\circ$  względem osi Z.
- Zygzak (ang. *zig-zag*): wzór składających się z łamanej otwartej na każdej warstwie płaszczyzny XY, podobny wizualnie do wzoru linii i drukowany z obrotem  $90^\circ$  względem osi Z na każdej kolejnej warstwie.
- Siatka (ang. *grid*): wzór wypełnienia, który w każdej warstwie w płaszczyźnie XY zawiera linie położone względem siebie pod kątem  $90^\circ$ . Często stosowany w drukowaniu prototypów.
- Trójkąty (ang. *triangles*): wzór ten składa się z nachodzących na siebie linii biegnących pod kątem  $60^\circ$  względem siebie w płaszczyźnie XY.
- Sześciiany (ang. *cubic*): ten wzór tworzą ułożone w stos sześciiany, nachylone o  $45^\circ$  względem osi X i Y. Wzór zapewnia stosunkowo dobrą wytrzymałość w trzech kierunkach, ale pochłania stosunkowo więcej materiału i czasu niż inne dostępne wzory.
- Wzór gyroid (ang. *gyroid*): wzór wypełnienia składający się z wklęsłych nieregularnych krzywizn, które przecinają się wzajemnie (często nazywany „strukturą gąbki”). Ten wzór wypełnienia zapewnia optymalną równowagę między wytrzymałością (w trzech kierunkach), zużyciem materiału i czasem drukowania.
- Wzór koncentryczny (ang. *concentric*): koncentryczny wzór wypełnienia to wewnętrzna struktura złożona z koncentrycznych linii pasujących do obrysu obwodu wydruku. Ten wzór cechuje się porównywalnie krótkim czasem wydruku i mniejszym zużyciem materiału, ale stosunkowo niedużą wytrzymałością. Najczęściej wzór ten stosuje się do elastycznych elementów.
- Wzór krzyżowy (ang. *cross*): siatka złożona ze struktur przypominających krzyże, które poprzez przestrzenie pomiędzy ściankami umożliwiają zginanie i skręcanie elementu drukowanego.

Analizując powyższe wzory wypełnienia i ich właściwości oraz ze względu na osobiste doświadczenia autorki z technologią FDM, standardowe wypełnienie typu siatkowego (ang. *grid*) o gęstości 20% powinno być wystarczające do wytworzenia w pełni funkcjonalnego prototypu pojazdu.

## Rozdział 3.

# Problem badawczy i proces projektowo-konstrukcyjny

Rozdział trzeci zawiera opis problemu badawczego i dostrzeżonej potrzeby rynkowej, która stała się motywacją do podjęcia działania związanego z realizacją badań. Ponadto w rozdziale trzecim przedstawione są założenia projektowe, a także opis przeprowadzonego procesu projektowo-konstrukcyjnego. Proces projektowo-konstrukcyjny obejmował kilka etapów, m.in.: etap konceptowania, projektowania, konstruowania oraz wytworzenia w pełni funkcjonalnego prototypu pojazdu za pomocą technologii FDM. Każdy ze zrealizowanych etapów procesu umożliwił stopniowe zbliżenie się do ostatecznego celu - konstrukcji optymalnej pojazdu dla dzieci z niepełnosprawnością ruchową. Ponieważ konstruktor może patrzeć na swoje dzieło subiektywnie, a także może nie dostrzegać popełnionych błędów, konieczna jest ocena i krytyka konstrukcji pomiędzy kolejnymi etapami przez specjalistów z branży i/lub użytkowników docelowych oraz weryfikacja doświadczalna, co również zostało ujęte w tym rozdziale.

### 3.1. Problem badawczy i założenia projektowe

Motywacją do podjęcia się tego projektu była dostrzeżona na rynku luka w dostępności i wyborze urządzeń służących do samodzielnego przemieszczania się, przeznaczone dla najmłodszych pacjentów z niepełnosprawnością ruchową kończyn dolnych. Na rynku zagranicznym (głównie amerykańskim i australijskim) istnieją nieliczne produkty umożliwiające samodzielne przemieszczanie się dzieci w wieku od ok. 9. miesiąca życia, czyli praktycznie od wieku, w którym dziecko zdobędzie umiejętność samodzielnego siedzenia (patrz. Podrozdział 2.1.3). Sprowadzając je do Europy ich cena sięga kilku tysięcy złotych. Ponadto, niektóre z tych urządzeń nie posiadają regulacji, która umożliwia dostosowanie pojazdu do zmieniających się rozmiarów dzieci i najczęściej po roku - dwóch wymagają wymiany na większy model. Konkurencyjne finansowo wydają się „garażowe” pojazdy Bumbas, które rodzice mogą sami złożyć sobie w domu, jednak ich konstrukcja pozostawia wiele wątpliwości w kwestii bezpieczeństwa użytkownika czy wytrzymałości. Dostrzeżona potrzeba skonstruowania pojazdu dla dzieci z niepełnosprawnością ruchową kończyn dolnych jest uzasadniona przede wszystkim korzyściami techniczno-ekonomicznymi, które wiążą się z wytworzeniem zoptymalizowanej konstrukcji za pomocą najbardziej

popularnej technologii addytywnej – FDM. Proponowany pomysł konstrukcji pojazdu dla dzieci jest zbieżny z istniejącymi rozwiązaniami pod względem koncepcji i przeznaczenia, jednak różni się od nich pod względem konstrukcyjnym, a także wyróżnia się na rynku ogólnoswiatowym pod względem docelowej technologii wytwarzania za pomocą technologii FDM.

W wyniku przeprowadzonych rozmów i konsultacji z rodzicami dzieci z niepełnosprawnościami ruchowymi oraz po analizie rankingów internetowych [103] opracowane zostały główne kryteria, którymi rodzice/opiekunowie kierują się podczas wyboru wózka inwalidzkiego dla podopiecznych:

- Ergonomia konstrukcji - dopasowanie do pacjenta, zapewniające np. wygodne obejmowanie kół;
- Masa własna urządzenia – lekkość konstrukcji (swoboda manewrowania wózkiem dla użytkownika);
- Akcesoria dodatkowe m.in.: uchwyt do pchania przez rodzica/opiekuna (łatwiejsza kontrola wózka), poduszki, podpórki;
- Atrakcyjność wizualna - spersonalizowane opcje stylistyczne (np. dobór kolorystyki i dodatków), dizajn przyjazny dzieciom;
- Regulacja (np. wysunięcie podnóżka) – dopasowanie do zmieniających się wymiarów rosnącego użytkownika;
- Łatwość montażu/demontażu oraz transportu i przechowywania;
- Łatwość dezynfekcji/czyszczenia elementów;
- Cena i opinie innych użytkowników.

Pomimo dużego wyboru na rynku wózków inwalidzkich dla juniorów oraz osób dorosłych, istnieje bardzo mało propozycji rozwiązań dla użytkowników w wieku poniżej 4 lat, których potrzeby samodzielności są równie ważne jak starszych pacjentów. Na podstawie powyższych informacji wyznaczone zostały główne kryteria projektowe dla proponowanego pojazdu dziecięcego:

- Umożliwienie najmłodszym pacjentom samodzielności i swobody przemieszczania się po powierzchniach płaskich (przede wszystkim w domu, żłobku, przedszkolu, salach i innych obiektach zamkniętych) oraz uczestniczeniu w zabawie z rówieśnikami (np. zapewnienie dostępu do sięgania po zabawki z podłogi);
- Zminimalizowanie kosztów wytwarzania pojedynczych egzemplarzy wózka oraz rozpowszechnienie dostępności projektu na skalę globalną poprzez dostosowanie konstrukcji do wytwarzania za pomocą technologii addytywnej - FDM, która poprzez swoją popularność i stosunkowo niski koszt urządzeń drukujących oraz filamentów umożliwi wytwarzanie pojazdu w jakimkolwiek miejscu na świecie;

- Zapewnienie odpowiedniej wytrzymałości i sztywności pojazdu;
- Zminimalizowanie masy własnej urządzenia poniżej 5 kg z uwzględnieniem ograniczeń i możliwości, które wynikają z wybranej technologii wytwarzania – FDM oraz procesu optymalizacji topologicznej w procesie projektowo-konstrukcyjnym;
- Zapewnienie prostoty konstrukcji poprzez minimalizację liczby elementów składowych wózka oraz prostej techniki montażu/demontażu elementów składowych, która zapewni trwałość i wytrzymałość połączeń;
- Zapewnienie ergonomii użytkowania oraz regulacji parametrów wózka do zmieniających się parametrów dzieci (szczególnie ich wzrostu);
- Opracowanie atrakcyjnej wizualnie postaci geometrycznej wózka i nadanie jej charakteru zabawki w celu usatysfakcjonowania oczekiwań najmłodszych pacjentów.

Na podstawie powyższych założeń rozpoczęta została faza koncyptowania, a więc rozważania koncepcji, które stanowiły w dalszych etapach procesu projektowo-konstrukcyjnego pole możliwych rozwiązań.

## **3.2. Proces projektowo-konstrukcyjny**

W procesie projektowo-konstrukcyjnym rozpatrywanym obiektem jest wytwór, którego konstrukcja jest zapisana w postaci zbioru cech. Jednym z początkowych etapów procesu projektowo-konstrukcyjnego po rozpoznaniu potrzeby i zidentyfikowaniu problemu projektowego oraz określeniu zbioru kryteriów jest proces koncyptowania – generowania pomysłów oraz opracowywania pola możliwych rozwiązań [21-25]. Proces ten rozpoczął się od szkiców obrazujących kolejne koncepcje pojazdu i generowania różnych pomysłów, które tworzyły pole możliwych rozwiązań. Wybrana koncepcja została opracowana w formie makiety, następnie w formie trójwymiarowego modelu wirtualnego, a ostatecznie wytworzono na tej podstawie w pełni funkcjonalny prototyp pojazdu.

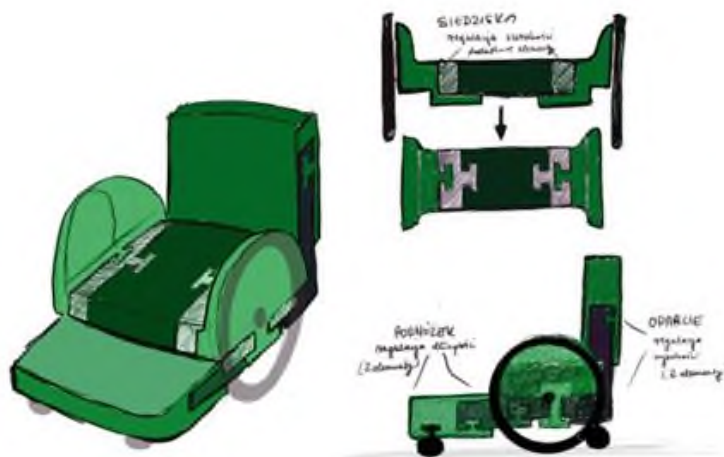
### **3.2.1. Analiza możliwych rozwiązań**

Pierwszą fazą procesu projektowo-konstrukcyjnego było generowanie pomysłów i ich zapis w postaci szkiców różnych koncepcji pojazdu. Na tym etapie rozważane były różne pytania i pomysły dotyczące m.in.:

- Ogólnej postaci geometrycznej - jak zaprojektować pojazd, aby był funkcjonalny, bezpieczny, ergonomiczny i jednocześnie wyróżniał się przyjaznym dla dzieci dizajnem.

- Głównego elementu – bazy całego pojazdu, do której dołączane będą kolejne elementy. Początkowo bazą miało być siedzisko, które zawierałoby otwory na połączenia wciskowe (tzw. jaskółcze ogony), jednak rozważano czy bezpieczniej będzie zintegrować siedzisko z bazą jako jeden element.
- Modułowości i montażu złożenia – jak podzielić elementy całej konstrukcji i umożliwić ich łączenie.
- Liczba i położenia kółek obrotowych. Ile kółek obrotowych jest konieczne do zapewnienia stabilności i bezpieczeństwa przy użytkowaniu pojazdu? Czy zastosować jedno kółko przeciw wywrotne pod siedziskiem, a dwa z przodu przy podnóżku? Czy dla lepszej stabilności dwa kółka obrotowe umieścić pod siedziskiem, a tylko jedno z przodu, które będzie umieszczone kilka mm wyżej niż powierzchnia podłoża i pracować będzie tylko przy pochylaniu się użytkownika na pojeździe (np. przy sięganiu po zabawkę na podłodze)?
- Elementów, które będą posiadać regulacje. Czy regulowana będzie długość pojazdu (np. poprzez dodawanie elementów modułowych siedziska / podnóżku lub poprzez wysuwanie elementów)? Czy regulowana będzie wysokość pojazdu (np. wysokość oparcia lub wysokość siedziska)? Czy pojazd będzie posiadać regulowaną szerokość – czy siedzisko będzie rozsuwane/ modułowe?

Wymienione wyżej pytania generowały wiele rozważań i koncepcji, które rozpoczęły długotrwały proces poszukiwań optymalnego rozwiązania. W tym czasie powstało wiele szkiców, z których wybrane zaprezentowano na Rys. 41.



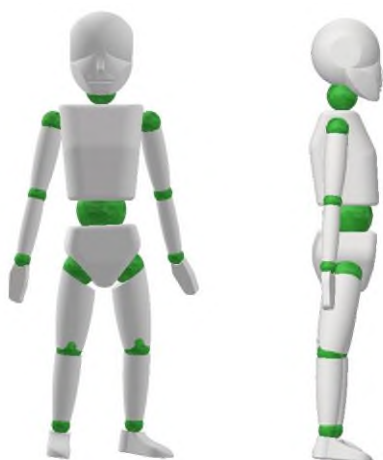
Rys. 41. Szkice koncepcyjne

Po fazie szkiców koncepcyjnych, a przed rozpoczęciem modelowania, przeprowadzono także szereg pomiarów i obserwacji zakresu ruchu dzieci mieszczących się w założonych wymiarach antropometrycznych. Analizowane także były różne koncepcje postaci geometrycznej pojazdu. Istotnym czynnikiem decydującym o postaci zewnętrznej pojazdu były zmieniające się rozmiary dzieci w założonym zakresie wieku. Projektowany pojazd musi mieć elementy, które umożliwią regulację wymiarów pojazdu. Na Rys. 42 zaprezentowano fizyczną weryfikację wymiarową monolitycznej makiety siedziska ze spienionego polistyrenu, która posłużyła do przeanalizowania proporcji urządzenia według dzieci w różnym wieku.



Rys. 42. Walidacja wymiarowa makiety siedziska dla dziecka w wieku 2 lat (po lewej) i 4 lat (po prawej)

W celu ograniczenia liczby tworzenia fizycznych makiet i umożliwienia przymiaru wirtualnego pojazdu zaszła konieczność wykonania modelu dziecka (manekina). Szczegółowe wytyczne dotyczące np. masy fizycznych manekinów w testowaniu tradycyjnych wózków inwalidzkich są opisane w normie PN ISO 7176-11 [98]. Na podstawie danych antropometrycznych, pomiarów własnych oraz siatek centylowych i proporcji ciała autorka zamodelowała wirtualne manekiny dziecięce, które odzwierciedlają dzieci w wieku 2-3 lat i stanowią przymiar wirtualny (Rys. 43).



Rys. 43. Model wirtualny manekina dziecka  $h = 90$  cm

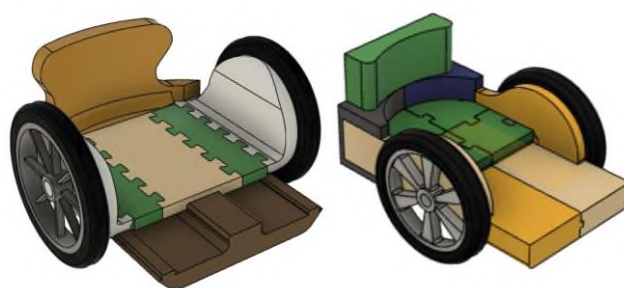


Testowanie pojazdu z użyciem manekinów pozwala m.in. na weryfikację wymiarów i proporcji pojazdu, przybliżonego rozkładu masy pasażera na poszczególnych częściach pojazdu, pomiar położenia środka masy układu dziecko-pojazd oraz umożliwienie regulacji jego położenia. W niniejszych badaniach założono, że przed wytworzeniem prototypu projektowany pojazd dla dzieci będzie testowany i weryfikowany w środowisku wirtualnym (Rys. 44).



Rys. 44. Wirtualne testowanie ergonomii i sprawdzenie odpowiednich wymiarów dla różnych koncepcji pojazdu

Przymiary manekina umożliwiły weryfikację odpowiednich wymiarów gabarytowych oraz proporcji wózka, bez wytwarzania kolejnych fizycznych makiet siedziska. Analizując zmieniające się proporcje ciał dzieci w wieku od 9 miesięcy do 4 lat – w pierwszych modelach wirtualnych założono budowę modelu składającego się z wielu modułowych elementów połączonych za pomocą połączeń wciskowych, które w zamyśle miały umożliwiać regulację wymiarów wózka odpowiednio do wymiarów użytkownika. Na podstawie tej koncepcji opracowane zostały modele wirtualne pojazdów (Rys. 45).



Rys. 45. Wstępne koncepcje urządzenia z modułowymi elementami „rosnącymi”

Koncepcja pojazdu modułowego zmieniała się wraz z obmyśleniem kolejnych rozwiązań i połączeń między elementami. Rozważane były różne konfiguracje złożenia elementów, m.in.:

- siedzisko złożone z elementów przypominających puzzle, które przy poszerzaniu/wydłużaniu rozmiarów bazy będą wymagać dodania dodatkowych elementów - puzzli;

- oparcie wysuwane, które miałyby pewien zakres regulacji wysokości, bądź oparcie podwyższane przez złożenie kolejnych elementów modułowych na siebie;
- podnózek poszerzany i wydłużany za pomocą składania kolejnych elementów modułowych;
- montaż kół na dwóch osobnych krótkich osiach (montowanych do ścianek bazy z każdej strony) lub na jednej osi, która przechodzi na wylot przez bazę główną i dodatkowo wzmacnia całą konstrukcję.

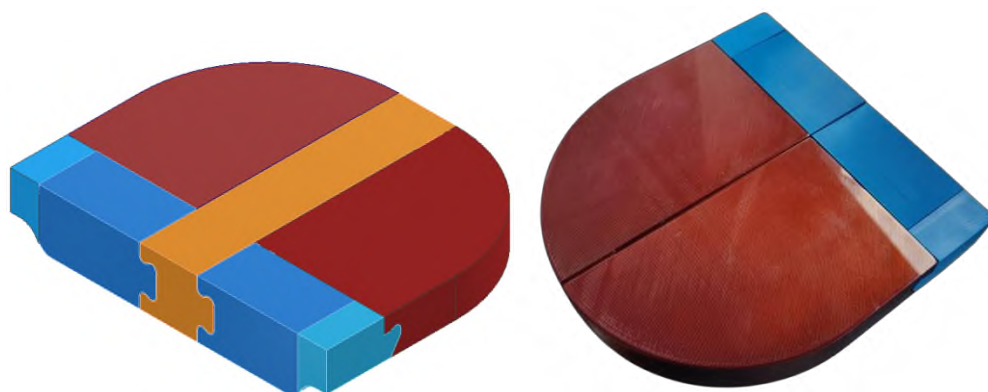
W procesie zmian konstrukcji pojazdu równolegle wytwarzane były prototypy różnych połączeń oraz wydruki próbne złożeń, które służyły do weryfikacji wykonanych modeli, a także wpływały na kolejne zmiany postaci konstrukcyjnych. W celu przetestowania połączeń wciskowych wytworzone zostały elementy składowe jednej z pierwszych koncepcji w podziałce 1:5 (Rys. 46).



Rys. 46. Wydruk testowy połączeń wciskanych w podziałce 1:5

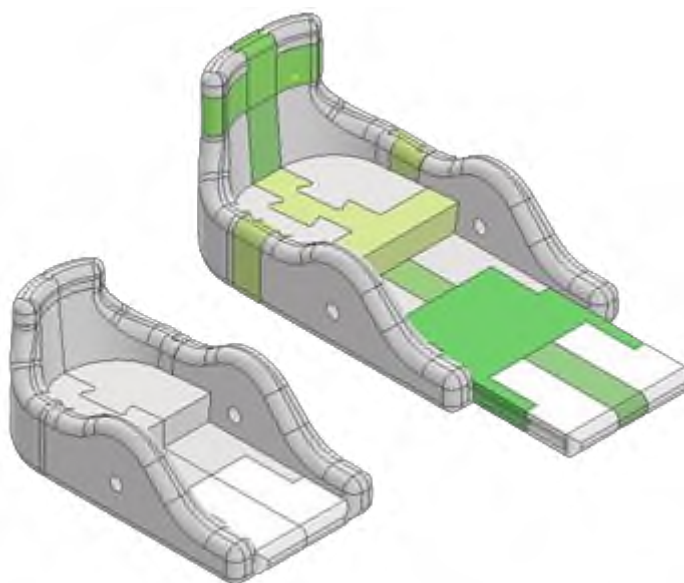
Fizyczne złożenie wózka nawet w podziałce 1:5 umożliwiło weryfikację połączeń z uwzględnieniem technologii ich wytwarzania – druku FDM, w którym bardzo istotną rolę odgrywa odpowiedni dobór tolerancji elementów współpracujących oraz uwzględnienie pojawienia się nierównomiernego skurczu materiału i wypaczenie wydruku. W analizowanym wydruku głównym problemem przy składaniu elementów były niewłaściwie dobrane tolerancje (za ciasne pasowanie), co utrudniało, a nawet uniemożliwiało połączenie elementów współpracujących (m.in. bazy i wsuwanego na nią podnóżka) i generowało szereg dodatkowych czynności związanych ze szlifowaniem, ścinaniem fragmentów modeli. Wnioskiem, który nasuwał się po analizie wydruku testowego była (poza dobraniem odpowiednich tolerancji) m.in. potrzeba ograniczenia liczby elementów składowych oraz uproszczenie konstrukcji wraz z minimalizacją liczby połączeń wciskowych (szczególnie w elementach, które posiadały kilka zakładek – tzw. „jaskółczych ogonów”). Na tym etapie przeprojektowano oraz ponownie przetestowano fizycznie

montaż elementów modułowych siedziska (Rys. 47), co zweryfikowało zastosowane kształty połączeń oraz dobrane tolerancje.



Rys. 47. Model bryłowy (po lewej) oraz wydruk testowy (po prawej) złożenia elementów modułowych siedziska w skali 1:1

W analizowanym przypadku dobrane tolerancje miały za dużą wartość i na złożeniach elementów pojawiły się widoczne luzy, jednak sama koncepcja połączenia poszczególnych elementów wydawała się właściwa. Na tej podstawie powstała nowa koncepcja pojazdu, której założeniem była konstrukcja modułowa zmieniającej swoje wymiary poprzez dodanie / odjęcie danego elementu (Rys. 48).



Rys. 48. Koncepcja pojazdu modułowego, który „rośnie” z użytkownikiem (elementy w zielonym kolorze są modułami, które zmieniają wymiary pojazdu)

Zanim przystąpiono do etapu prototypowania, model wirtualny pojazdu modułowego został skonsultowany z rodzicami dzieci z niepełnosprawnością ruchową (podopiecznymi Fundacji „Krzyż Dziecka” [42]) oraz z opiekunami naukowymi prowadzonych badań, a także pracownikami Specjalnego Ośrodka Szkolno–Wychowawczego dla Dzieci i Młodzieży Niepełnosprawnej

w Dąbrowie Górniczej [113]. W wyniku konsultacji zdecydowano o potrzebie zmiany modelu na bardziej atrakcyjny wizualnie z uwzględnieniem kilku dodatkowych zmian konstrukcyjnych. Zmiany te dotyczyły m.in.:

- dodanie klina, który blokuje dziecko przed mimowolnym wysuwaniem się z siedziska;
- pochylenie kół na zewnątrz o kąt  $5^\circ$  względem pionu w celu uzyskania większej stabilizacji wózka oraz łatwiejszego manewrowania;
- przeprojektowanie siedziska na „kubelkowe” i pochylenie go pod kątem  $5-10^\circ$  względem płaszczyzny poziomej w celu ustabilizowania dziecka w siedzisku i zapobieganie jego przepadaniu w przód;
- zaplanowaniu otworów montażowych na pas bezpieczeństwa;
- ograniczeniu liczby elementów składowych wózka.

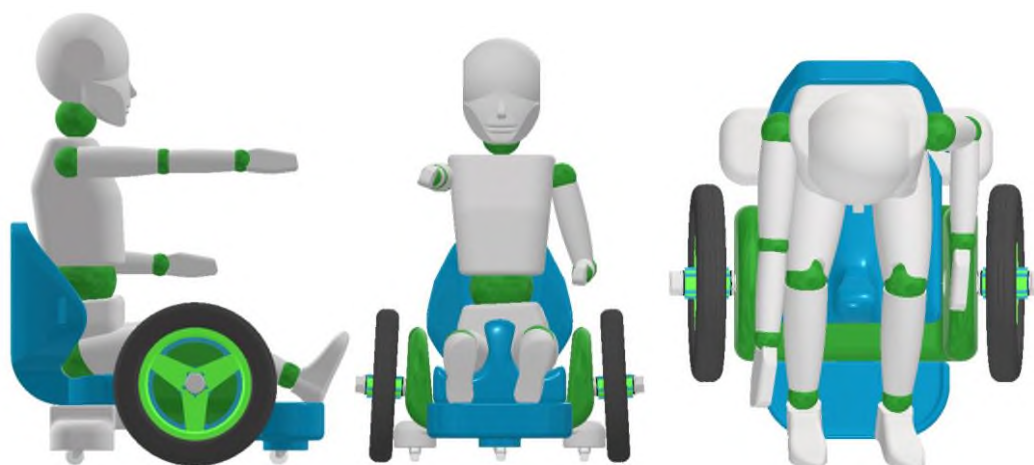
W wyniku konsultacji i rozmów powstała kolejna koncepcja pojazdu. Liczba elementów składowych pojazdu została ograniczona do 4 elementów głównych (baza główna, baza dolna, siedzisko, podnóżek) oraz pozostałych elementów m.in.: osi, kół 10”, kółek obrotowych itp. Nowy model wirtualny został przedstawiony na Rys. 49.



Rys. 49. Nowy model bryłowy pojazdu w różnych widokach

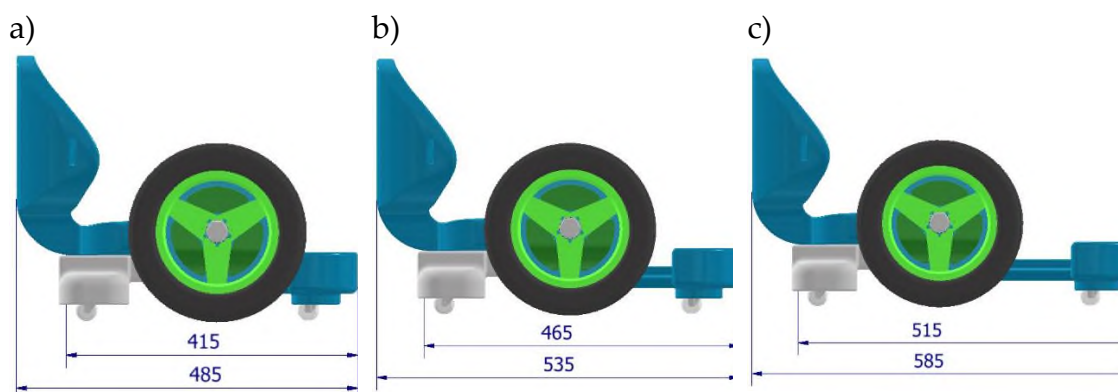
Siedzisko wózka zostało zaprojektowane jako jednolita bryła bez możliwości regulacji jej szerokości/wysokości. Uwzględniając zmieniający się obwód bioder dzieci w docelowym zakresie wieku oraz noszenie pieluchy przez młodsze dzieci, zdecydowano o odpowiednim wyprofilowaniu siedziska z oparciem i zapewnieniu wyciętej przestrzeni z boków, co umożliwiło dopasowanie do zmieniającej się szerokości bioder rosnącego użytkownika.

Model bryłowy został także przetestowany wirtualnie pod kątem ergonomii oraz zgodności wymiarów z manekinem użytkownika o wysokości 90 cm i jego zakresie ruchu (Rys. 50).



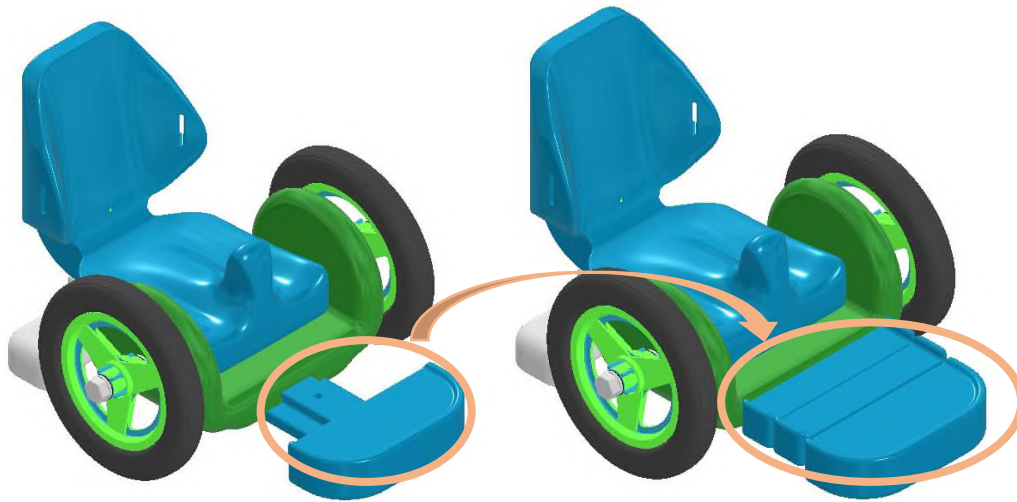
Rys. 50. Przymiar wirtualny manekina

Najbardziej zmieniającym się wymiarem u dzieci w wieku od 9. miesiąca do 4. roku życia jest wzrost (szczególnie zmiana długości kończyn dolnych), dlatego zdecydowano, że priorytetowym parametrem, który będzie regulowany w pojeździe będzie wysunięcie podnóżka i/lub siedziska. Regulacja wysunięcia podnóżka została zaprojektowana w 3 pozycjach co 50 mm (głębokość pojazdu mierzona od siedziska do końca podnóżka zmienia się w pozycjach ok. 415 / 465 / 515 mm - Rys. 51).



Rys. 51. Regulacja wysunięcia podnóżka

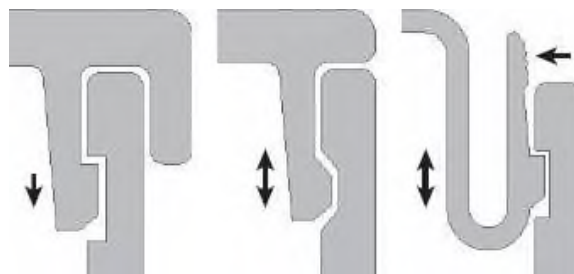
Jedynym modułowym elementem zastosowanym w tej koncepcji pojazdu jest przedłużenie podnóżka, które wsuwane jest na prowadnicę przy jego regulacji (Rys. 52).



Rys. 52. Elementy modułowe podnóżka

Przy dalszym doskonaleniu konstrukcji pojazdu, zdecydowano o zastąpieniu podnóżka modułowego jednobryłowym modelem w celu ograniczenia elementów składowych pojazdu (patrz: podrozdział 3.2.2.).

W kilku połączeniach (m.in. osi kół oraz elementu blokującego ruch wzdłużny podnóżka) zastosowano połączenie zatrzaskowe (ang. *snap-fit joint*, Rys. 53) [65], jednak po przetestowaniu wydruków próbnych napotkano szereg problemów związanych m.in. z poziomem elastyczności elementów oraz z pękaniem i rozwarstwianiem się wydruków na połączeniu.



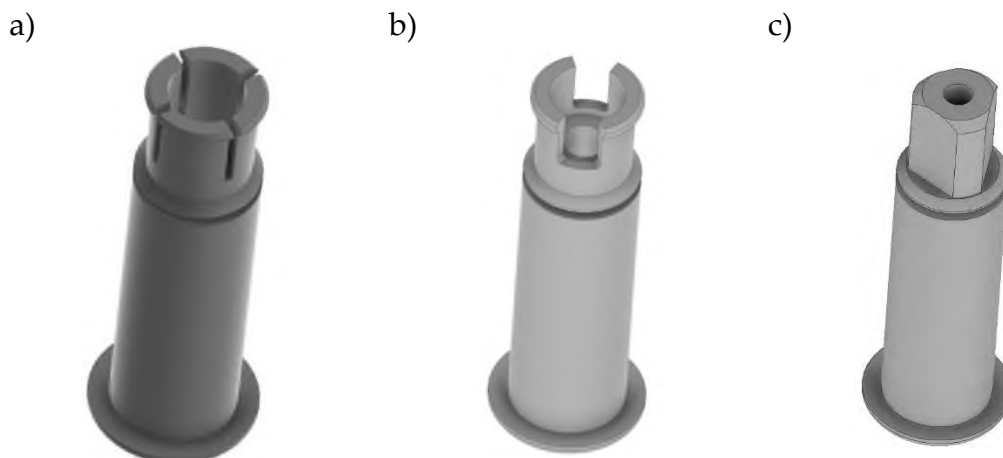
Rys. 53. Połączenia zatrzaskowe [101]

Połączenia wciskowe ograniczone zostały do połączeń między siedziskiem – bazą – a podnóżkiem oraz pozbawione zostały wypustek w formie „jaskółczego ogona”. Blokowanie ruchu wzdłużnego podnóżka względem bazy głównej było na początku zaplanowane jako połączenie zatrzaskowe z użyciem trzpienia, który byłby umieszczony w otworze podnóżka i za pomocą kołnierza zatrzaskowego ustalałby elementy. Po wydruku modelu testowego i próbie umieszczenia go w otworze trzpień pękł na warstwie przy połączeniu zatrzaskowym (Rys. 54).



Rys. 54. Test elementu blokady ruchu wzdłużnego podnóżka względem bazy

Rozważano także różne modyfikacje trzpienia, m.in. zmianę grubości jego ścianki, dodanie otworów zapewniających luz przy ugięciu kołnierza zatraskowego, osadzenie śruby wewnątrz trzpienia, itp. jednak ostatecznie zdecydowano o wyeliminowaniu tego elementu na rzecz zwykłego połączenia śrubowego. Podobnie przebiegał proces obmyślenia sposobu montażu osi kół do bazy głównej. Zdecydowano się na dwie niezależne osie, które osadzone będą w otworach w bazie głównej pod kątem  $5^\circ$  względem płaszczyzny pionowej. Początkowe pomysły zakładały wyeliminowanie śruby bądź zastosowanie jej tylko jako wzmocnienie osi kół – wewnątrz tulei, jednak ze względu na problemy związane ze sztywnością elementów drukowanych w technologii FDM i pękaniem na warstwach, na które działały największe naprężenia ścinające, zdecydowano o konieczności uwzględnienia śruby w montażu osi oraz odpowiedniemu zaplanowaniu otworów w bazie głównej na osadzenie mosiądzowych tulei gwintowanych. Ponadto rozważane i testowane były różne modele osi z zakończeniem kołnierzowym (zatraskowym), który unieruchomiłby oś w bazie głównej jeszcze przed wkręceniem śruby (Rys. 55 a, b).



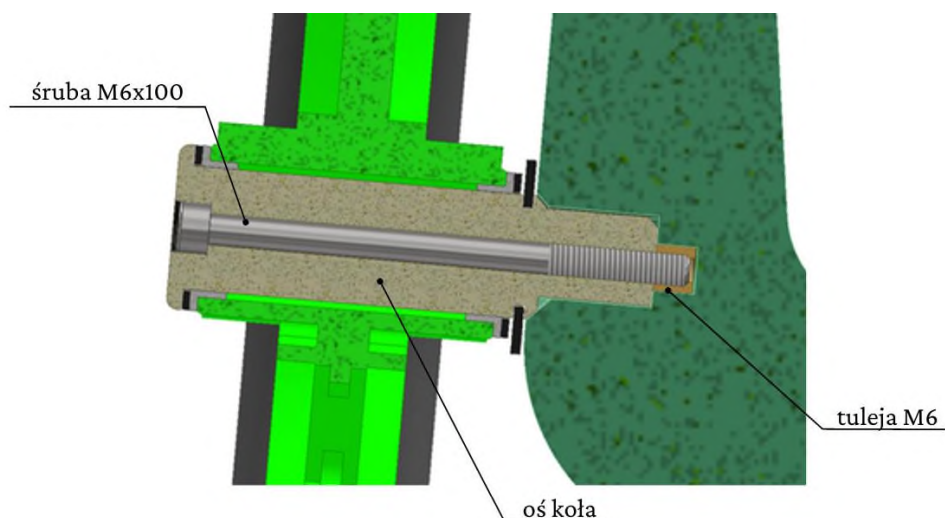
Rys. 55. Modele bryłowe testowanych połączeń osi kół z bazą główną

Przy testowaniu połączeń kołnierzowych pojawił się również szereg problemów związanych z pękaniem wydruków przy próbie montażu osi (Rys. 56).



Rys. 56. Test połączenia wciskowego osi

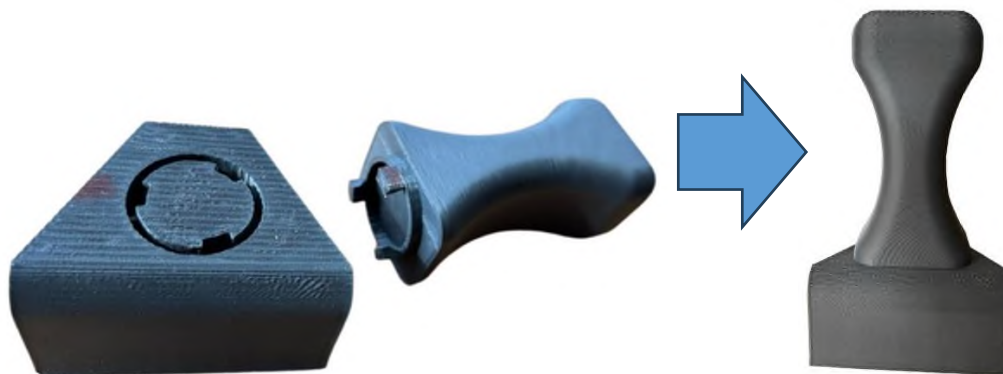
Szczegółowo analizując powstałe koncepcje zdecydowano o uproszczeniu modelu osi i wyeliminowaniu połączeń kołnierzowych. Ostatecznie oś koła posiada otwór na śrubę oraz zakończenie, które ścięte jest na trzech powierzchniach, co umożliwia bezpośrednie dopasowanie do odpowiadającego temu kształtu otworu w bazie głównej (Rys. 55c). Koła napędzane przez użytkownika montowane są do wózka na osiach wzmocnionych wewnątrz metalową śrubą M6x100 z łbem walcowym imbusowym (DIN 912), która mocowana jest do tulei gwintowanej M6 wtopionej za pomocą lutownicy w bazę wózka (Rys. 57) (proces montażu tulei patrz podr. 3.2.6).



Rys. 57. Widok przekroju przez otwór montażowy osi kół



Zintegrowane siedzisko z oparciem posiadało w pierwotnych koncepcjach demontowany klin separujący nogi użytkownika i blokujący wysuwanie się z siedziska. Początkowo planowano zastosować połączenie obrotowo-zatrzaskowe klina z siedziskiem, jednak przy testowaniu wydruku tego połączenia (Rys. 58) uznano, że łatwość montażu/demontażu przez dziecko w trakcie użytkowania pojazdu może stwarzać niepożądane ryzyko wysunięcia się użytkownika z siedziska i wpływać na obniżenie bezpieczeństwa pojazdu, dlatego ostatecznie zdecydowano się na zintegrowanie klina z siedziskiem.

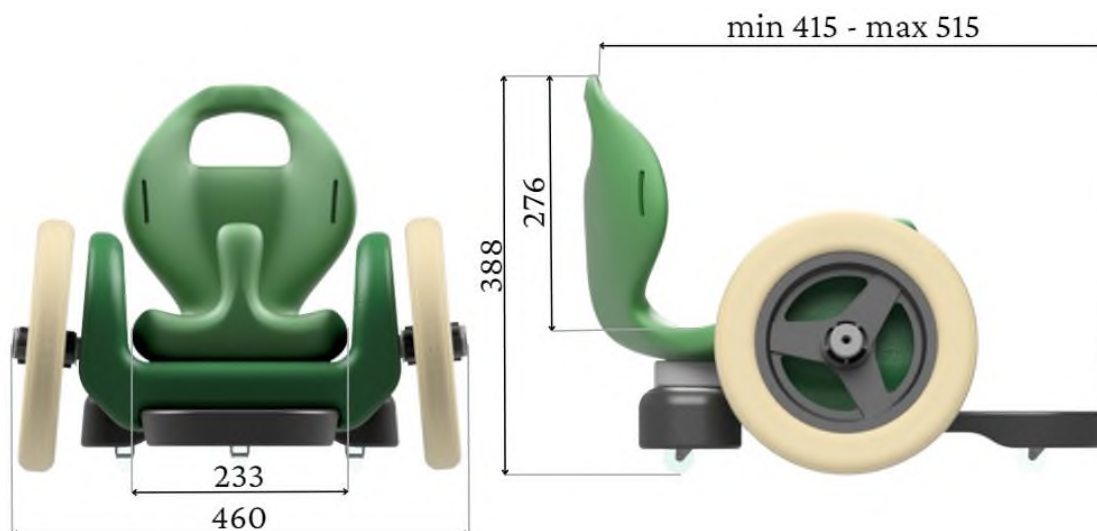


Rys. 58. Test połączenia wciskowo-obrotowego dla elementu separującego nogi użytkownika

Podsumowując etap rozważań różnych koncepcji pojazdu i połączeń pomiędzy elementami, można zauważyć tendencję do minimalizacji liczby elementów składowych całego pojazdu. Fizyczne testowanie różnych połączeń elementów zweryfikowało skutecznie koncepcje, które początkowo wydawały się właściwe na rzecz uproszczonych i niezawodnych połączeń m.in. śrubowych. Etap analizy możliwych rozwiązań wpłynął w bardzo dużym stopniu na docelową postać geometryczną projektowanego pojazdu.

### 3.2.2. Geometryczne cechy konstrukcyjne

Geometryczne cechy konstrukcyjne dotyczą postaci struktury zewnętrznej i układu wymiarów. Geometryczne cechy konstrukcyjne pojazdu zostały wyznaczone przede wszystkim na podstawie przymiaru wirtualnego oraz obserwacji zmieniających się proporcji ciała dziecka. Głównym rozmiarem, który zmienia się poprzez zastosowanie regulacji podnóżka jest głębokość siedziska (zmieniająca się w zakresie od 41,5 cm do 51,5 cm). Ponadto siedzisko wyprofilowane jest w taki sposób, aby zapewnić przestrzeń do zmieniającej się szerokości bioder dzieci. Układ głównych wymiarów został przedstawiony na poniższej ilustracji (Rys. 59).



Rys. 59. Wymiary gabarytowe wózka podane w mm

Koła pojazdu zostały pochylone względem płaszczyzny pionowej o  $5^\circ$ , co zapewnia lepszą stabilność oraz skrętność pojazdu. W oparciu zamodelowane zostały otwory na pas bezpieczeństwa o szerokości 40 mm. Poza otworami na pas, zdecydowano także o zamodelowaniu w siedzisku otworu na np. drąg o  $\varnothing 20$  mm, który umożliwi pchanie wózka przez opiekuna. Ponadto, w oparciu umieszczono otwór pełniący rolę uchwytu siedziska (o szerokości 80 mm i wysokości 35 mm), które umożliwi przenoszenie pojazdu.

### 3.2.3. Materiałowe cechy konstrukcyjne

Ze względu na wybraną technologię przyrostową – FDM, wybór materiałów ograniczył się do tworzyw sztucznych, które są stosowane do produkcji filamentów. Docelowym wyborem materiału prototypu został filament PLA (patrz podrozdział 2.4.2.1.). Cechy konstrukcyjne wynikające z doboru materiału związane były między innymi z zaplanowaniem odpowiedniej zwartej postaci geometrycznej modeli. Ponadto zastosowanie tworzywa termoplastycznego umożliwia osadzanie w nim elementów takich jak, np. inserty gwintowane i inne elementy metalowe, mające na celu połączenie różnych elementów. Cechy konstrukcyjne uwarunkowane wybranym materiałem – PLA, dotyczą także eliminacji w konstrukcji drobnych zagłębień i miejsc, w których mogłyby gromadzić się brud, wilgoć (ciecze) ze względu na biodegradowalność materiału i obniżenie jego własności wytrzymałościowych w danym obszarze narażonym na ciągły kontakt np. z wodą.

### 3.2.4. Technologiczne cechy konstrukcyjne

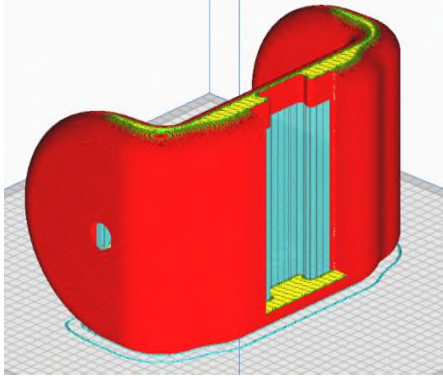
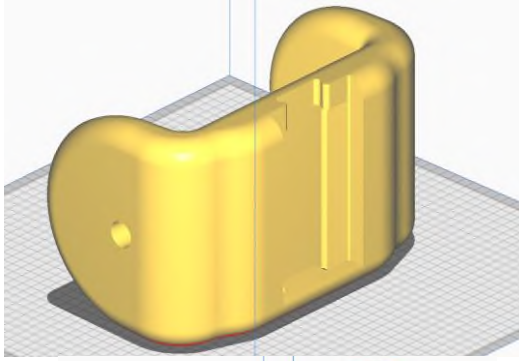
Technologiczne cechy konstrukcyjne wyznaczają proces technologiczny, który zapewni uzyskanie oczekiwanych własności wytworu.

Wybrana technologia wytworzenia pojazdu to technologia addytywna FDM. Wszystkie elementy wózka zostały zaprojektowane i podzielone w taki sposób, aby umożliwić ich wytworzenie na urządzeniach dostępnych w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej (m.in. urządzenie Tronxy X5SA-500 Pro Large oraz Creality Ender 5 Plus), których przestrzeń robocza determinuje wielkość docelowych elementów.

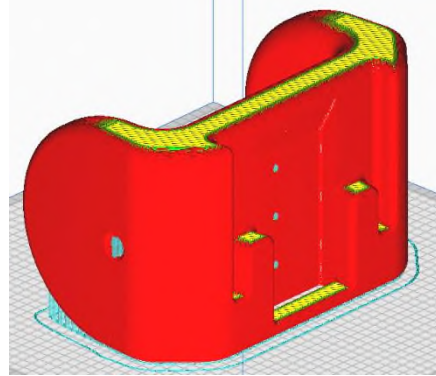
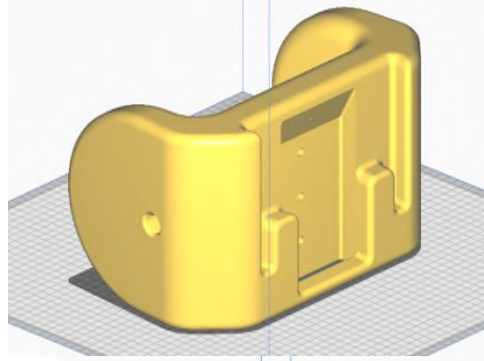
Ponadto postać konstrukcyjna każdego z modeli została zweryfikowana w oprogramowaniu typu *Slicer* (Ultimaker Cura) pod względem optymalnej orientacji w przestrzeni roboczej drukarek oraz ilości wygenerowanych podpór zewnętrznych podczas druku. Ścianki modeli, które bezpośrednio stykają się z powierzchnią stołu roboczego drukarki zostały zaprojektowane w miarę możliwości jako płaskie powierzchnie. Niektóre z elementów zostały zmodyfikowane w celu minimalizacji niepotrzebnych podpór zewnętrznych, które stanowią odpad (straty) materiału oraz pogarszają jakość powierzchni podpartych po usunięciu (zwiększają ich chropowatość). Oprogramowanie generuje suporty w miejscach, gdzie elementy modeli znajdują się pod kątem poniżej  $45^\circ$  -  $50^\circ$  względem stołu urządzenia, aby przeciwdziałać sile grawitacji i zapobiegać deformacji struktury wydruku.

Jednym z przykładów elementów, które zostały zmodyfikowane jest baza główna pojazdu (Rys. 60a), w której po przeprojektowaniu otworu montażowego na podnózek oraz zastosowanie pochylonej pod kątem  $45^\circ$  powierzchni zamiast równoległej do stołu drukarki udało się zminimalizować suporty zewnętrzne (Rys. 60b). Masa materiału odpadowego w początkowym modelu wynosiła 121 g, natomiast po modyfikacjach wartość ta została obniżona do 19 g.

a)

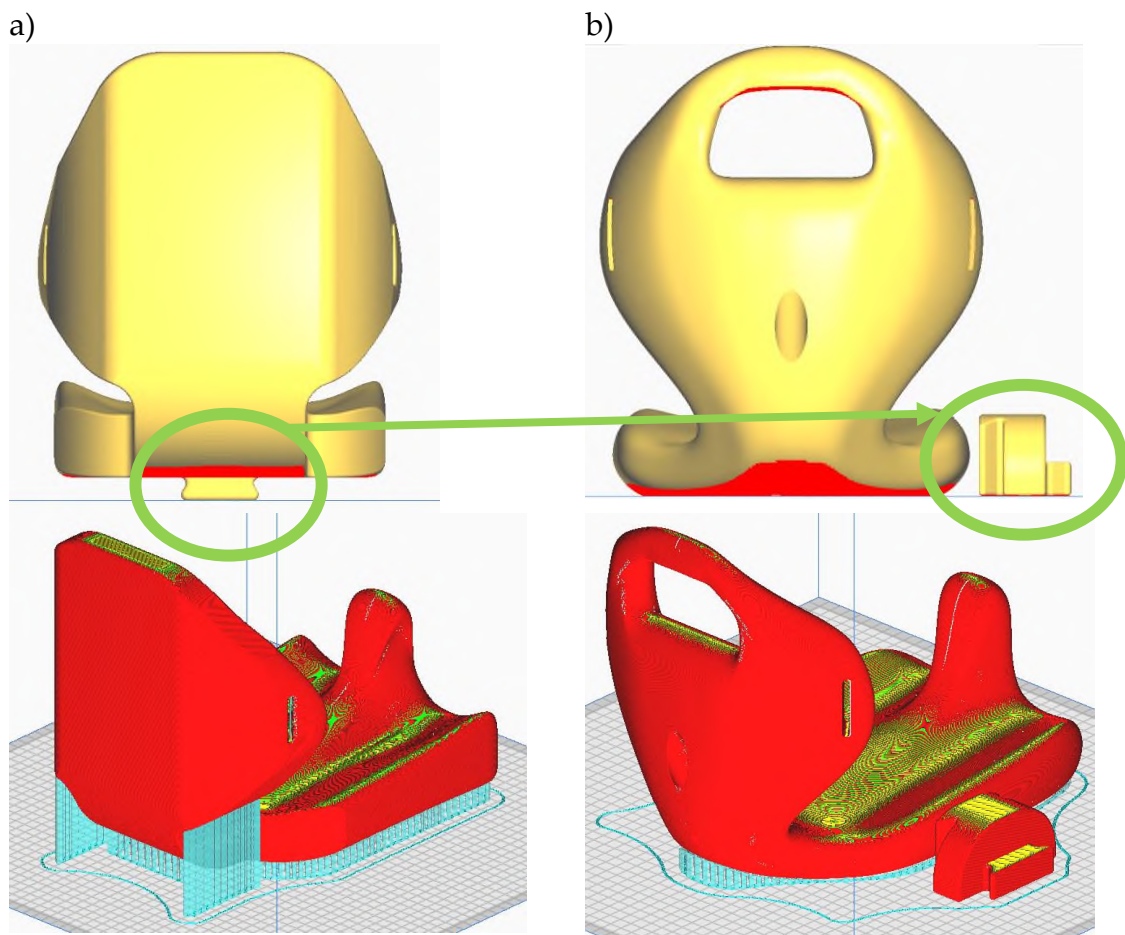


b)



Rys. 60. Modyfikacja postaci geometrycznej modelu w celu minimalizacji podpór zewnętrznych (błękitny kolor)

Innym elementem, który wymagał modyfikacji z powodu generowania dużej ilości struktury podporowej (suportów) było siedzisko (Rys. 61a). Początkowa masa filamentu zużytego na materiał podporowy wynosiła 447 g i po oczyszczeniu wydruku materiał ten staje się odpadem. W celu minimalizacji zużycia oraz odpadu materiału połączenie siedziska z bazą zostało zastąpione dodatkowym elementem – łącznikiem. Łącznik zastąpił wypust montażowy znajdujący się na spodniej części siedziska. W siedzisku zamodelowana została wnęka montażowa, co w dużym stopniu ograniczyło ilość materiału zużytego na materiał podporowy. Ponadto w siedzisku przekonstruowane zostało także oparcie i wyeliminowano ostre przejścia powierzchni bocznych w taki sposób, aby model mógł zostać wytwarzany z minimalną ilością suportów. Po modyfikacjach masa materiału podporowego, który zostanie usunięty po wydruku siedziska oraz łącznika wynosi jedynie 35 g.



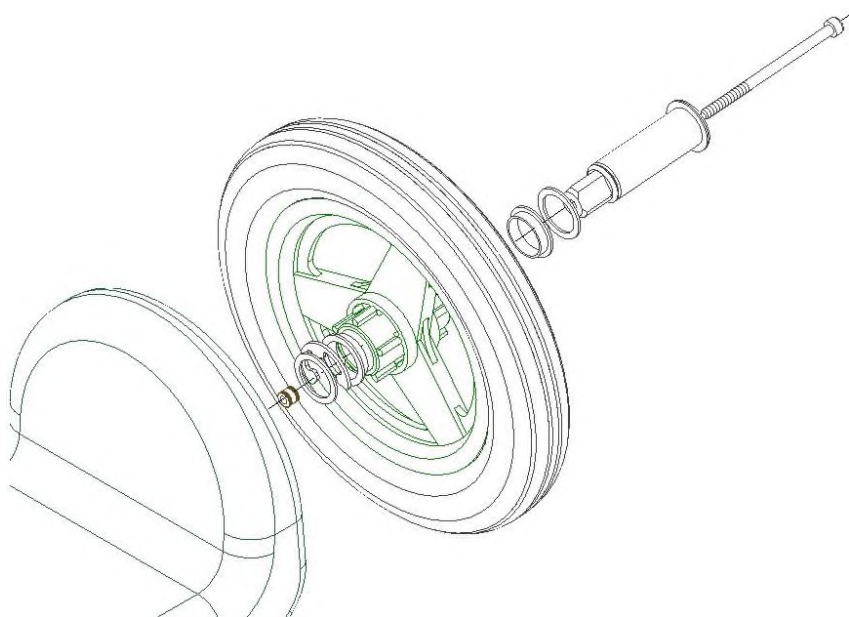
Rys. 61. Modyfikacja modelu siedziska

Ponadto każdy z elementów współpracujących został odpowiednio zaprojektowany z tolerancją ok. 0,5 – 1 mm w taki sposób, aby połączenia elementów nie wymagały dodatkowego szlifowania, a zapewniały ewentualny luz potrzebny m.in. na regulację długości podnóżka.

### 3.2.5. Dynamiczne (montażowe) cechy konstrukcyjne

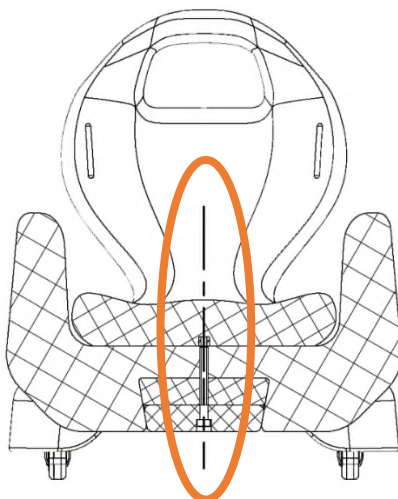
Podczas wykonywania modeli uwzględniono także dynamiczne cechy konstrukcyjne, czyli cechy związane z montażem poszczególnych elementów współpracujących. Technologia FDM poza możliwościami, które niesie w kontekście wytwarzania, wymaga także wykonania szeregu dodatkowych czynności w celu montażu poszczególnych elementów współpracujących. Po analizie i testowaniu szeregu różnych połączeń wciskowych, zatraskowych i przesuwnych (patrz podrozdział 3.2.1) zdecydowano, że należy uprościć i zminimalizować liczbę połączeń między poszczególnymi elementami złożenia, a dodatkowo w miejscach newralgicznych (np. montaż osi kół, blokada ruchu wzdłużnego elementów względem siebie) należy zastosować połączenia

śrubowe z użyciem mosiądzowej tulei gwintowanej osadzonej w wydruku z tworzywa sztucznego (Rys. 62).



Rys. 62. Widok rozstrzelony poszczególnych elementów montażowych osi kół

Jednym z najbardziej newralgicznych miejsc całego pojazdu jest otwór ustalający cztery elementy całości złożenia (siedzisko, bazę główną, bazę tylną oraz podnóżek). W otwór ten mocowana jest śruba imbusowa M6x70 (DIN 912), która wkręcana jest kluczem imbusowym do tulei gwintowanej umieszczonej w siedzisku (Rys. 63).



Rys. 63. Widok przekroju elementów złożenia przy otworze montażowym

Połączenia śrubowe blokują ruch wzdłużny elementów, które w złożeniu zmontowane są ze sobą poprzez ich wsuwanie.

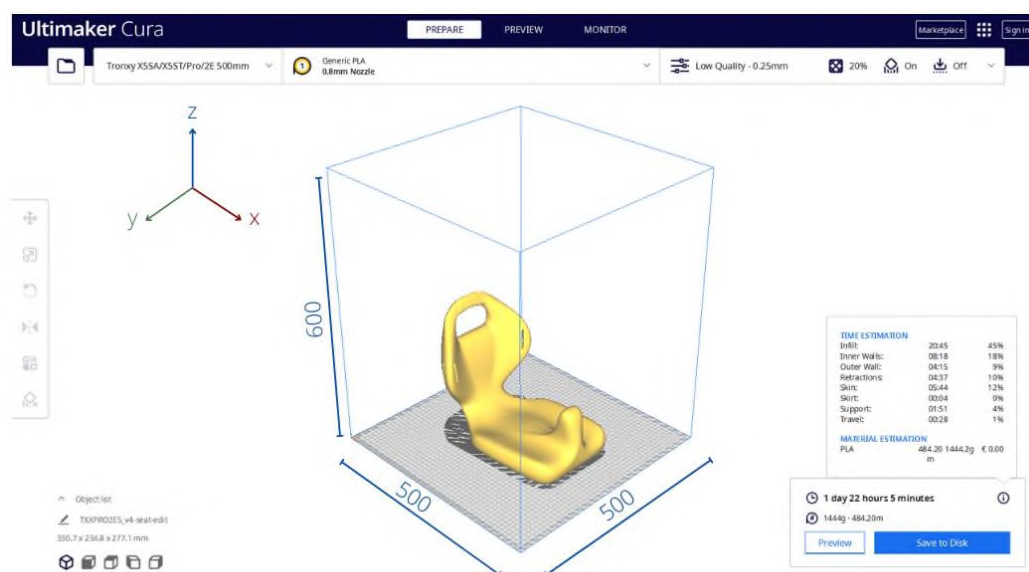
### 3.2.6. Prototyp

Przed przystąpieniem do wytwarzania prototypu za pomocą technologii FDM, model pojazdu został przeanalizowany wytrzymałościowo dla kilku wybranych przypadków obciążeń. Przeprowadzone w tym celu badania symulacyjne przedstawione zostały w dalszej części rozprawy (patrz: rozdział 4). Przeanalizowany wytrzymałościowo model bryłowy pojazdu posiadający wszystkie wymienione wcześniej cechy konstrukcyjne został przedstawiony na Rys. 64.



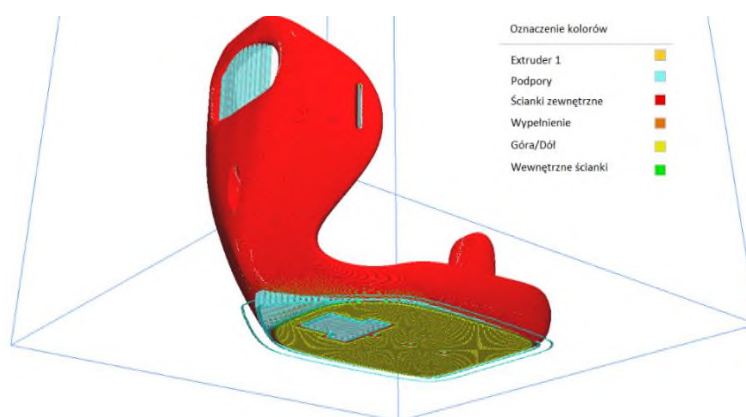
Rys. 64. Model bryłowy wózka przed wydrukiem prototypu

Przygotowane modele 3D poszczególnych elementów pojazdu zostały wyeksportowane jako pliki w formacie STL (ang. *stereolithography*). Format STL powstał w 1987 r. jako wynalazek zaproponowany przez firmę 3D Systems na potrzeby wytwarzania przestrzennego za pomocą stereolitografii. Pliki STL mają formę tekstowych poleceń, w tym instrukcji wykonywanych w pętli, które definiują siatkę wielokątów opisujących geometrię powierzchni modelu 3D [91]. Pliki STL zostały zaimportowane do oprogramowania Ultimaker Cura (tzw. *slicer*, Rys. 65), którego zadaniem jest przetwarzanie trójwymiarowego modelu na warstwy i wygenerowanie poleceń dla drukarki 3D (w formacie G-Code). Ultimaker Cura jest oprogramowaniem działającym na licencji OpenSource [120]. W oprogramowaniu Ultimaker Cura istnieje możliwość wyboru urządzenia, na którym wytwarzane będą elementy.



Rys. 65. Widok okna oprogramowania Ultimaker Cura

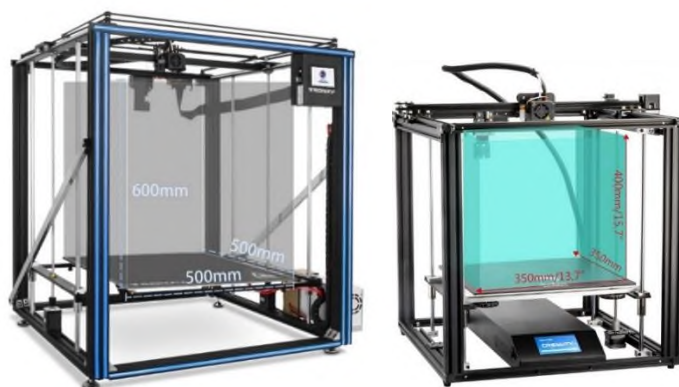
Przy generowaniu podglądu procesu wytwarzania poszczególnych elementów oprogramowanie automatycznie oznacza poszczególne struktury, które zostaną wytworzone w procesie druku 3D. Na Rys. 66 przedstawiono przykład podglądu wydruku siedziska, na którym m.in. w kolorze czerwonym oznaczone są ścianki zewnętrzne wydruku, natomiast w kolorze błękitnym – materiał podporowy (suport).



Rys. 66. Podgląd wydruku siedziska wraz z oznaczeniem poszczególnych struktur

Elementy składowe pojazdu dla dzieci wydrukowane zostały na dwóch urządzeniach (Rys. 67). Siedzisko i baza kół napędowych ze względu na swoje gabaryty wydrukowane zostały na urządzeniu Tronxy X5SA-500 Pro Large, które cechuje się przestrzenią roboczą o wymiarach: 500 x 500 x 600 mm [28]. Pozostałe elementy wydrukowane zostały na drukarce Creality Ender 5 Plus, której przestrzeń robocza posiada wymiary: 350 x 350 x 400 mm [27].





Rys. 67. Urządzenia wykorzystane do wydruku elementów: a) Tronxy X5SA-500 Pro [28], b) Creality Ender 5 Plus [27]

Elementy zostały wytworzone z filamentu PLA produkowanego w formie tzw. szpuli (Rys. 68). Do wytworzenia dwóch największych gabarytowo elementów: siedziska oraz bazy pojazdu zużyte zostały dwie szpule filamentu PLA o masie 2,5 kg (filament Nebula PLA Green Grass 1,75 mm [39]). Dla pozostałych elementów wykorzystano filament PLA dostarczany w szpulach o masie 0,8 kg (PLA Multicolour Silk Jungle 1,75mm 0,8kg – producent Rosa 3D Filaments [38]).



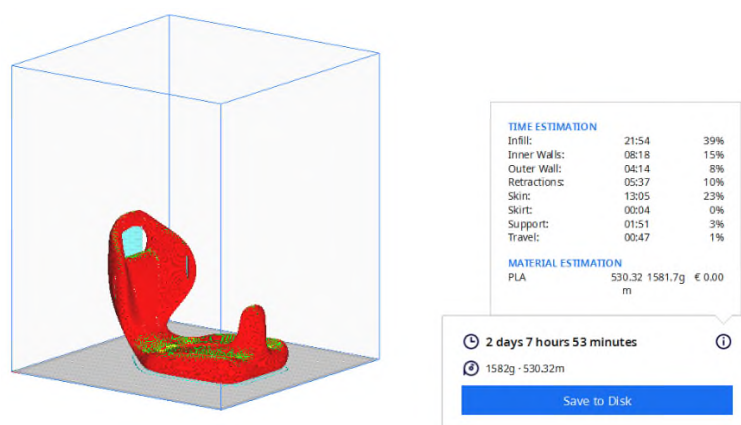
Rys. 68. Filamenty PLA użyte do wydruku

Grubość ścianki wydruku dobiera się w zależności przeznaczenia oraz rozmiaru i geometrii modelu 3D, a także w zależności od używanego materiału do druku 3D. W przypadku technologii FDM i filamentu PLA zalecana minimalna grubość ścianek wynosi 1 mm, jednak dla drukowanych elementów współpracujących ze sobą przyjęto ściankę o grubości 2 mm (baza kół tylnych, łącznik i podnóżek) oraz 2,4 mm (siedzisko i baza). Elementy wytwarzane w technologii FDM mają mniejszą wytrzymałość wzdłuż osi Z drukarki, dlatego elementy, na które działają obciążenia zostały zorientowane w najkorzystniejszy możliwy sposób, aby działające na nie siły nie ścinały elementów na warstwach poprzecznych. Wszystkie elementy prototypu zostały wydrukowane według następujących ustawień: wypełnienie typu siatka (ang. *grid*) oraz gęstość wypełnienia 20%. Grubość ścianki zewnętrznej wydruków została ustawiona na 2 mm, natomiast w przypadku siedziska i bazy – elementów, które przenoszą największe obciążenia – na 2,4 mm. W tabeli Tab. 7 przedstawione zostały poszczególne ustawienia dotyczące wydruków.

Tab. 7. Podstawowe parametry druku poszczególnych elementów

Element	Urządzenie	Średnica dyszy [mm]	Wypełnienie	Gęstość wypełnienia	Grubość ścianki zewnętrznej
<b>Siedzisko</b>	Tronxy	0,8	Grid	20%	2,4 mm
<b>Baza</b>	Tronxy	0,8	Grid	20%	2,4 mm
<b>Podnózek</b>	Creality	0,4	Grid	20%	2 mm
<b>Baza kół tylnych</b>	Creality	0,4	Grid	20%	2 mm
<b>Łącznik</b>	Creality	0,4	Grid	20%	2 mm
<b>Osie kół</b>	Creality	0,4	Grid	20%	2 mm

Dla wybranego zestawu danych wejściowych oprogramowanie Ultimaker Cura tworzy szybką analizę procesu druku i podaje informacje na temat przewidywanego czasu wytwarzania oraz ilości potrzebnego materiału (Rys. 69).



Rys. 69. Analiza danych wejściowych dla wydruku siedziska przy wypełnieniu: siatka o gęstości 20% oraz grubości ścianki 2,4 mm

Dla przyjętych danych wejściowych wydruku zestawiono w tabeli Tab. 8 dane dotyczące przewidywanej przez Slicer ilości (masy oraz długości) potrzebnego filamentu na wytworzenie poszczególnych elementów razem z suportami. Na podstawie masy wydruku oszacowane zostało

zapotrzebowanie na filament PLA oraz jego szacunkowa cena (przy założeniu ceny filamentu brutto ok. 75 PLN / kg patrz: Tab. 4 – według danych z roku 2023).

Tab. 8. Dane dotyczące zużycia filamentu i czasu druku

Element	Liczba	Masa wydruku	Długość filamentu	Szacunkowa cena materiału [PLN]
<b>Siedzisko</b>	1	1444 g	484,2 m	108,3
<b>Baza</b>	1	1871 g	627,3 m	140,3
<b>Podnózek</b>	1	627 g	210,2 m	47,1
<b>Baza kół tylnych</b>	1	454 g	152,2 m	34,1
<b>Łącznik</b>	1	81 g	27,3 m	6,1
<b>Osie kół</b>	2	16 g	5,5 m	2,4
			<b>SUMA</b>	<b>338,3 PLN</b>

Koszt zużycia filamentu oszacowany został na niecałe 340 PLN, jednak ze względu na to, że szpule filamentu sprzedawane są najczęściej w standardowych opakowaniach o masie 1 kg, a dla większych modeli (m.in. wydruku siedziska czy bazy) wymagany będzie zakup szpuli o masie min. 2 kg to realny koszt związany z zakupem filamentu wynosi ok. 450 PLN. Szacunkowe koszty związane ze zużyciem prądu (Tab. 9) poprzez długotrwałą pracę urządzeń FDM zostały przekalkulowane przy założeniu poboru mocy podanego przez producentów urządzeń: ok. 550 W dla urządzenia Creality Ender 5 Plus oraz ok. 600 W dla urządzenia Tronxy 500 Pro, a także przy założeniu średniej ceny prądu 1 PLN / kWh według danych na rok 2023. Ponadto w tabeli została umieszczona kolumna, w której przedstawiony jest % czasu całkowitego druku przeznaczony na wydruk podpór zewnętrznych, które po wytworzeniu modelu zostają usunięte i stanowią materiał odpadowy.

Tab. 9. Szacunkowe koszty zużycia prądu przy wydruku poszczególnych elementów

Element	Liczba	Urządzenie	Czas [h]	% czasu wydruku podpór	Szacunkowy koszt [PLN]
<b>Siedzisko</b>	1	Tronxy	46 h 5 min	4%	27,6
<b>Baza</b>	1	Tronxy	62 h 42 min	1%	37,6
<b>Podnózek</b>	1	Creality	39 h 11 min	0%	21,5
<b>Baza kół tylnych</b>	1	Creality	28 h 23 min	0%	15,6
<b>Łącznik</b>	1	Creality	5 h 41 min	0%	3,1
<b>Osie kół</b>	2	Creality	1 h 57 min	0%	2,2
				<b>SUMA</b>	<b>107,6 PLN</b>

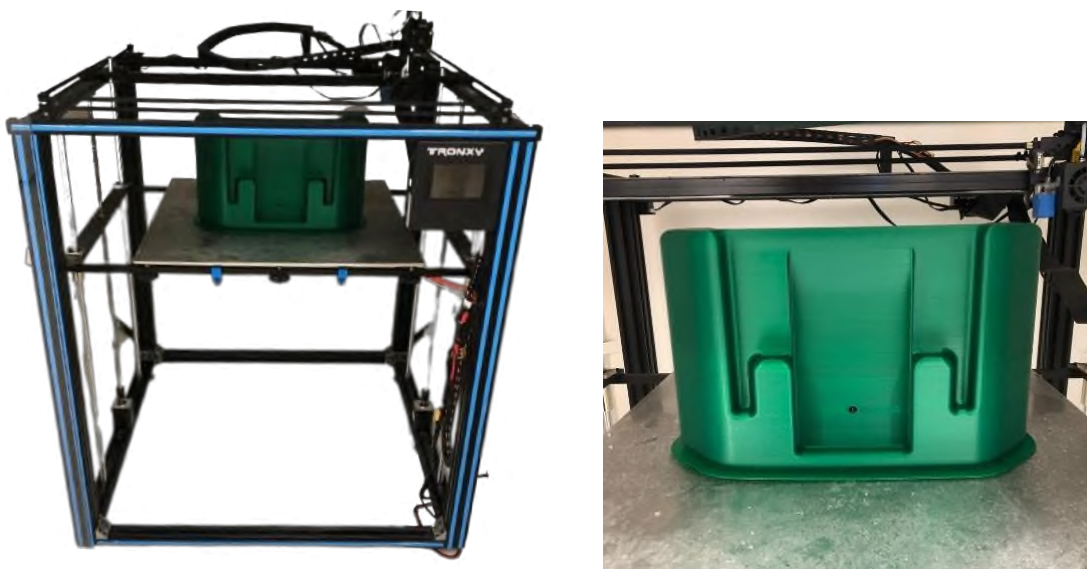
Analizując dane z powyższej tabeli, można zauważyć, że procent czasu potrzebny do wydrukowania podpór poszczególnych elementów nie przekracza 5%, co oznacza, że poprzez właściwe zaprojektowanie modeli bryłowych materiałów podporowych został ograniczony możliwie do minimum. Prototyp pojazdu zawiera kilka elementów znormalizowanych (m.in. śruby, podkładki), a także gotowych rozwiązań dostępnych na rynku (np. koła 10", kółka obrotowe, tuleje gwintowane). Wszystkie potrzebne elementy składowe pojazdu zostały zestawione w poniższej tabeli (Tab. 10).

Tab. 10. Zestawienie elementów złożenia

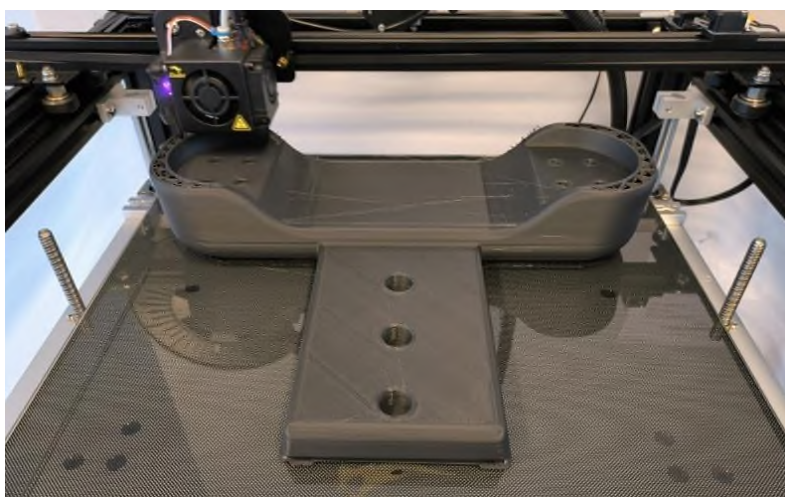
Nr	Nazwa	Liczba	Norma/Producent	Cena za szt.	Razem [PLN]
1	Koło B'TWIN RunRide 10"	2	Decathlon [29]	49,90	99,80
2	Kółko obrotowe $\varnothing$ 30mm	3	Habi [30]	5,30	15,90
3	Tuleja gwintowana M4x8	12	3D reactor [32]	1,20	14,40
4	Tuleja gwintowana M6x8	5	3D reaktor [32]	2,40	12,00
5	Śruba imbusowa z łbem kulistym M4x8	12	ISO 7380-1	1,30	15,60
6	Śruba imbusowa z łbem walcowym M6x70	1	DIN 912	0,70	0,70
7	Śruba imbusowa z łbem walcowym M6x100	2	DIN 912	0,90	1,80
8	Podkładka zwykła 24	4	DIN 125/ PN 82005	0,30	1,20
9	Płytką osadczą 19 mm	2	DIN 6799	3,99	7,98
10	Tuleja ślizgowa z igilduru® $\varnothing$ 24mm	4	IGUS [31]	14,20	56,80
				<b>SUMA</b>	<b>226,18</b>

Ceny wydruków FDM zostały oszacowane na podstawie zużytego filamentu oraz czasu druku według danych z tabeli Tab. 8 i Tab. 9. Koszt zużytego materiału na elementy wytwarzane w technologii FDM stanowi ok. 450 PLN, natomiast koszt zużytego prądu ok. 108 PLN. Koszt związany z zakupem elementów składowych wynosi ok. 226 PLN, co zamyka główne koszty

wytwarzania pojazdu w cenie ok. 784 PLN<sup>1</sup>. Na cenę końcową całego urządzenia ma wpływ także ewentualnie sam zakup urządzenia, amortyzacja i elementy zamienne urządzenia, koszt pracy operatora, zakup droższych filamentów w ciekawej kolorystyce lub droższych elementów zamiennych itp. Po przeanalizowaniu kosztów i ustawieniu wszystkich parametrów urządzenia i druku, przystąpiono do wytwarzania każdego z elementów. Według podanych wcześniej informacji największe modele tj. siedzisko i baza wytworzone zostały za pomocą urządzenia Tronxy (Rys. 70), a pozostałe za pomocą urządzenia Creality (Rys. 71) dostępnych w pracowniach Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej.



Rys. 70. Widok pierwszego wydruku - baza wózka, urządzenie Tronxy

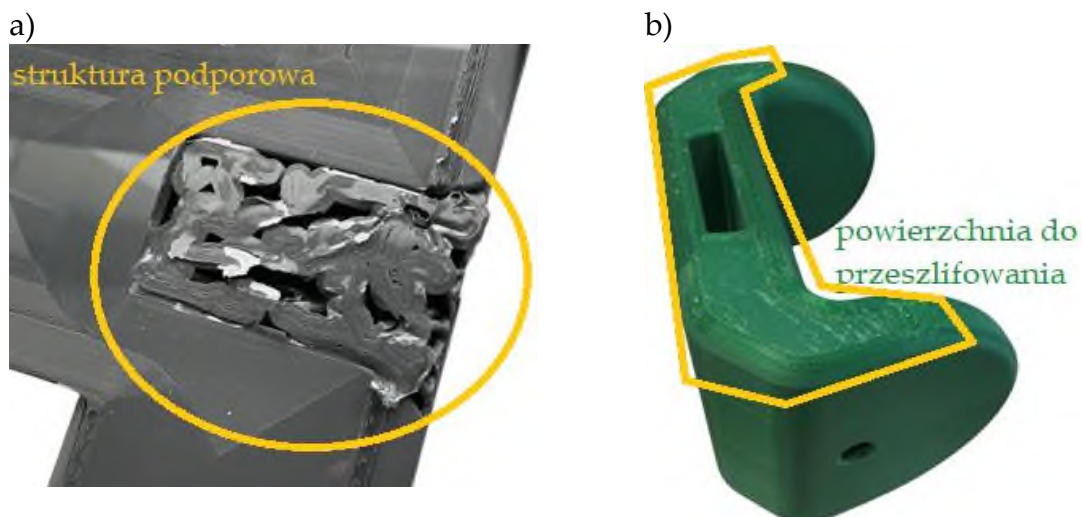


Rys. 71. Wydruk bazy kół tylnych na urządzeniu Creality Ender 5 Plus

---

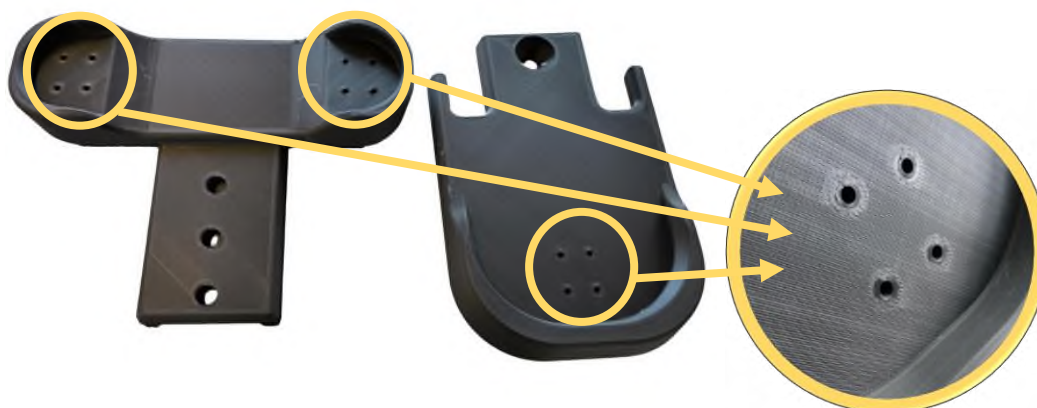
<sup>1</sup> Koszty wytworzenia pojazdu zostały oszacowane w pierwszym kwartale roku 2023 r. na podstawie ówczesnych cen produktów.

Po wydrukowaniu wszystkich elementów nastąpił krótki proces obróbki końcowej tzw. *postprocessingu* (Rys. 72), czyli m.in. usuwania nadmiaru materiału pozostawionego przez struktury podporowe (głównie w otworach i wnękach) oraz wygładzanie niektórych powierzchni poprzez np. szlifowanie (m.in. tych powierzchni, które miały bezpośredni kontakt ze strukturą suportu bądź platformą (stołem roboczym) urządzenia).



Rys. 72. Operacje obróbki końcowej: a) usunięcie podpór b) wygładzenie powierzchni

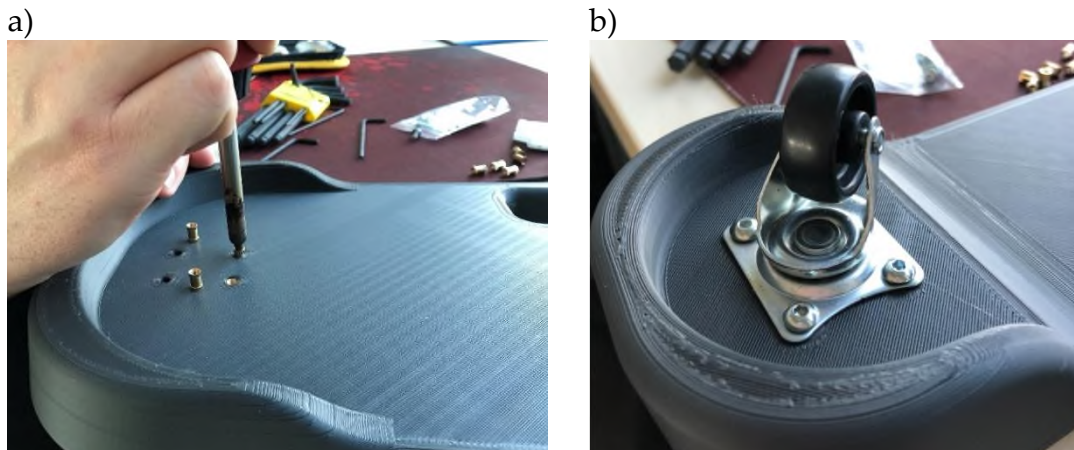
Elementy łączące się z bazą pojazdu (podnózek oraz baza kół tylnych) posiadają otwory (Rys. 73) przygotowane na montaż płytki kółek obrotowych za pomocą 4 śrub imbusowych M4x8 z łbem kulistym (ISO 7380).



Rys. 73. Otwory montażowe kółek obrotowych w bazie kół tylnych oraz podnóżku

Za pomocą lutownicy (Rys. 74) w otwory montażowe kółek obrotowych wtopione zostały specjalne miedziane tuleje gwintowane (tzw. inserty), które przeznaczone są do osadzania w gotowych wydrukach 3D. Rozwiązanie to pozwala łączyć ze sobą poszczególne elementy wykonane przy pomocy technologii addytywnej przy zastosowaniu połączeń śrubowych. Ponadto stosowanie insertów umożliwia pominięcie skomplikowanego i czasochłonnego

procesu gwintowania wydruków (o ile – ze względu na własności materiałowe i technologiczne – gwintowanie jest w ogóle możliwe). Montaż insertów gwintowanych odbywa się zazwyczaj za pomocą lutownicy, która rozgrzewa insert ustawiony przy otworze poprzez szybkie przewodnictwo ciepłe mosiądz. Rozgrzany insert uplastycznia miejscowo materiał termoplastyczny wydruku 3D i stopniowo wtapiany jest w otwór, natomiast po odsunięciu źródła ciepła (lutownicy) materiał zastyga blokując insert osadzony wewnątrz otworu.



Rys. 74. a) Wtapianie tulei gwintowanych w otwory wydruku za pomocą lutownicy, b) Zamontowane kółko obrotowe

Wydruk prototypu umożliwił weryfikację połączeń poszczególnych elementów pojazdu. Dobór odpowiednich tolerancji umożliwił prawidłowe złożenie całego urządzenia oraz jego regulację (Rys. 75).



Rys. 75. Prototyp po złożeniu elementów

Wydrukowany prototyp wózka wraz z elementami składowymi (koła, śruby, osie itp.) został zważony (Rys. 76) i jego masa własna wynosiła 5,06 kg, co stanowi graniczną wartość założonej wcześniej masy dopuszczalnej urządzenia.





Rys. 76. Masa całkowita pojazdu: 5,06 kg

### 3.2.7. Walidacja i weryfikacja prototypu

Prototyp został przetestowany fizycznie przez dzieci z wymienionego zakresu wieku i wymiarów antropometrycznych. W wózku zastosowano także prototyp pasa biodrowego. Ukazany na Rys. 77 prototyp pasa tworzyła parczana taśma nośna o szerokości 40 mm z naszytym rzepem taśmowym i wkładką piankową amortyzującą ewentualny ucisk pasa na brzuch użytkownika.



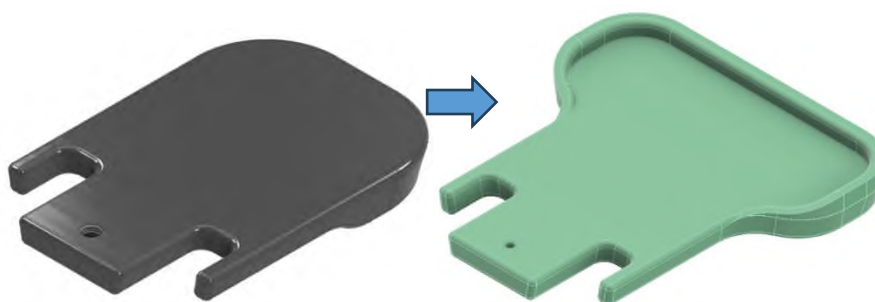
Rys. 77. Prototyp pasa bezpieczeństwa

Jednym ze spostrzeżeń dotyczących samej konstrukcji wózka był zbyt wąski i płaski podnóżek, który nie blokował zsuwania się stóp dziecka na podłogę (Rys. 78). Kwestia ta wymagała zmiany konstrukcji samego podnóżka.



Rys. 78. Weryfikacja fizyczna pojazdu z użytkownikiem w wieku: 2 lata, wzrost: 90 cm, masa: 15 kg

Poza tym prototyp wózka okazał się w pełni funkcjonalny. Testerzy wózka intuicyjnie bez żadnych instrukcji przemieszczali się nim po podłodze mieszkania z różną szybkością. Z obserwacji płynności ruchu pojazdu zauważono także dość niską jakość wykonania kółek obrotowych, które przy testowaniu na stosunkowo gładkiej powierzchni (panele) o niskim współczynniku tarcia zacięły się w początkowym położeniu bez wykonania skrętu. Sugestią autorki jest zakup lepszej klasy produktu niż przedstawione w zestawieniu elementów (patrz: Tab. 10. Zestawienie elementów złożenia). W weryfikacji przetestowano także stabilność pojazdu przy różnych pozycjach użytkownika (np. pochylaniu się dziecka do przodu, sięganie po zabawki na podłodze). Jednak nawet przy tym teście pojazd pozostał w równowadze i żadna z testowanych pozycji użytkowników (m.in. wychylenie na boki oraz w przód) nie zachwiała jego stabilności. Po wstępnej analizie i walidacji prototypu przekonstruowany został jedynie podnóżek pojazdu (Rys. 79).



Rys. 79. Modyfikacja podnóżka

Poza poszerzeniem przedniej części podnóżka, wokół jego krawędzi zamodelowano kołnierz, który zapobiega ześlizgiwaniu się stóp użytkownika z powierzchni podnóżka (Rys. 80). Ponadto w celu większej atrakcyjności wizualnej dla najmłodszych użytkowników zakupiono atrakcyjny wizualnie dwubarwny filament i ponownie wytworzono elementy, które wcześniej były

wykonane z filamentu o jednolitej czarnej barwie (podnóżek, baza kółek tylnych i łącznik).



Rys. 80. Ponowny wydruk podnóżka, bazy kółek tylnych oraz łącznika

Nowe wydruki zostały zamontowane w złożeniu pojazdu, który został z powodzeniem przetestowany przez wybranych użytkowników (Rys. 81).



Rys. 81. Fizyczne testowanie prototypu z przeprojektowanym podnóżkiem

Jednym z wyników testowania prototypu przez dzieci jest ich pozytywna opinia w aspekcie psychologicznym – urządzenie zostało odebrane przez dzieci jako zabawka i z ochotą przystąpiły do testowania pojazdu. Pozytywny odbiór urządzenia przez najmłodszych jest bardzo istotną informacją zwrotną dla autorki urządzenia, gdzie celem była także minimalizacja stygmatyzacji użytkowników urządzeń rehabilitacyjnych czy medycznych poprzez ich wygląd zewnętrzny, który jednoznacznie kojarzył się z niepełnosprawnością. Po walidacji prototypu przez dzieci w pełni sprawne, zdecydowano o poddaniu prototypu próbie walidacji przez dzieci z niepełnosprawnością ruchową (Rys. 82). Stało się to dzięki uprzejmości pracowników i podopiecznych Specjalnego Ośrodka Szkolno–Wychowawczego dla Dzieci i Młodzieży Niepełnosprawnej w Dąbrowie Górniczej [114] oraz ich rodziców. Pojazd został tam przetestowany

pod nadzorem opiekunów przez dzieci z niepełnosprawnością ruchową kończyn dolnych.



Rys. 82. Test pojazdu przez czteroletniego użytkownika z niedowładem kończyn dolnych

Dzieci z ośrodka SOSW testujące pojazd mieściły się w granicach danych antropometrycznych podanych w podrozdziale 2.2 (Rys. 83).



Rys. 83. Test pojazdu przez trzyletnią użytkowniczkę

Testy pojazdu przebiegły w ośrodku SOSW w pomieszczeniach, w których podłogi pokryte były wykładziną PCV (typową wykładziną stosowaną w żłobkach, przedszkolach i salach zabaw). W tym przypadku również zauważony został niewielki brak płynności skrętu kółek obrotowych i zasugerowana ich wymiana na rozwiązanie o lepszym wykonaniu pod względem jakości. Po testach fizycznych, walidacji oraz weryfikacji połączeń elementów wózka prototyp został uznany za gotowy do użytkowania. Poniższe ilustracje przedstawiają końcową wersję prototypu, który został zweryfikowany przez użytkowników (Rys. 84).



Rys. 84. Prototyp końcowy

Widok prototypu z przodu i z tyłu został przedstawiony na Rys. 85.

a)

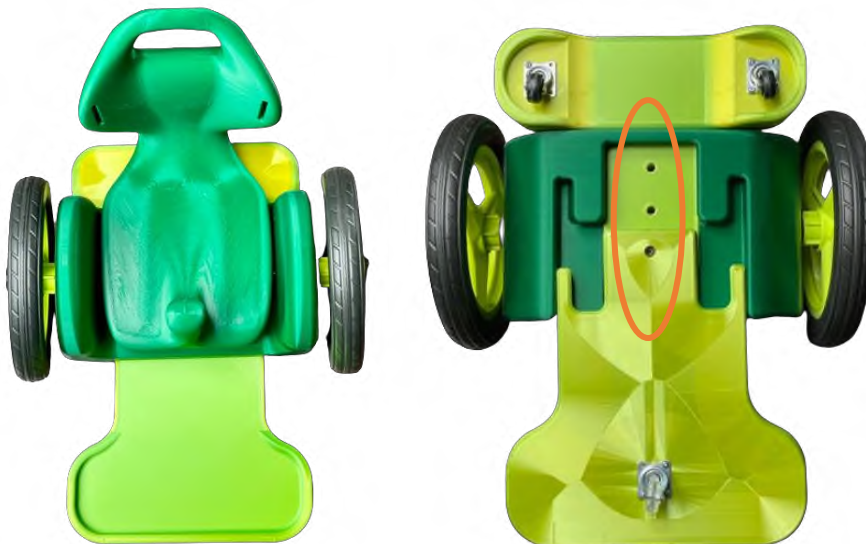


b)



Rys. 85. Widok prototypu: a) z przodu i b) z tyłu

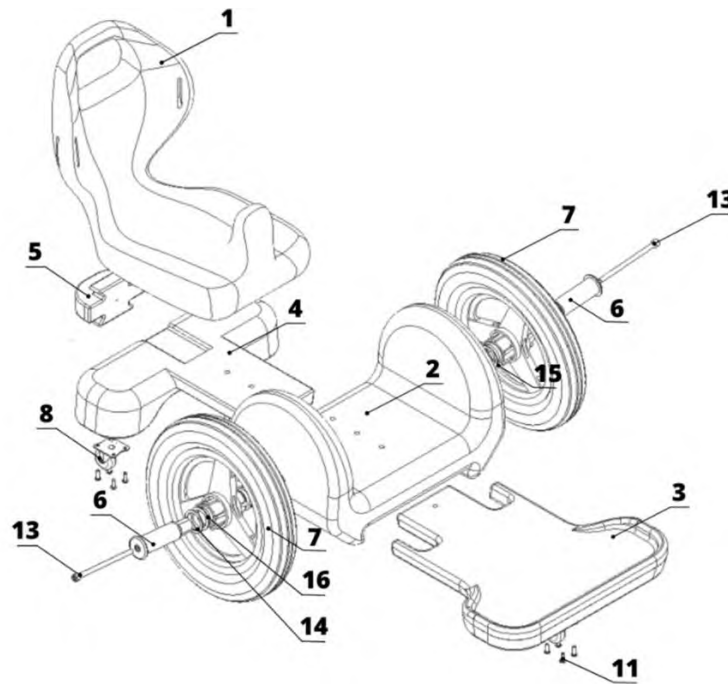
Na Rys. 86 przedstawiony jest widok prototypu z góry i z dołu. Podnóżek wysunięty jest w maksymalnej konfiguracji. Na widoku z dołu (Rys. 86b) widać trzy otwory służące do regulacji wysunięcia podnóżka.



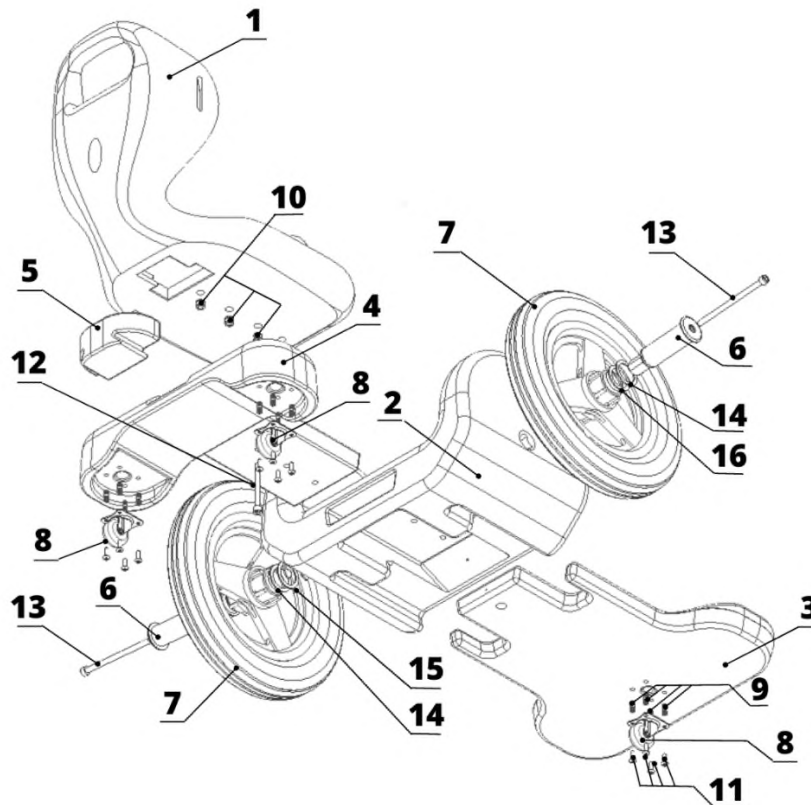
Rys. 86. Widok prototypu: a) z góry b) z dołu

Na Rys. 87 i Rys. 88 zaprezentowany jest widok rozstrzelony złożenia pojazdu wraz z oznaczeniami elementów zgodnie z numeracją przedstawioną poniżej:

1. siedzisko,
2. baza główna,
3. podnóżek,
4. baza tylna,
5. łącznik,
6. oś,
7. koło 10",
8. kółko obrotowe  $\varnothing$  30 mm,
9. tuleja gwintowana M4x8,
10. tuleja gwintowana M6x8,
11. śruba z łbem kulistym z gniazdem imbusowym M4x8 ISO 7380,
12. śruba z łbem walcowym z gniazdem imbusowym M6x70 DIN 912,
13. śruba z łbem walcowym z gniazdem imbusowym M6x100 DIN 912,
14. podkładka zwykła  $\varnothing$  24mm DIN 125,
15. płytki osadcza sprężynująca  $\varnothing$  19 mm DIN 6799,
16. tuleja ślizgowa z igilduru® z kołnierzem IGUS  $\varnothing$  24 mm.



Rys. 87. Izometryczny widok rozstrzelony złożenia pojazdu - widok od czoła z góry



Rys. 88. Izometryczny widok rozstrzelony złożenia pojazdu - widok od tyłu z dołu

W celu minimalizacji masy całkowitej pojazdu model bryłowy urządzenia poddany został kolejnym etapom procesu projektowo-konstrukcyjnego związanych z analizą wytrzymałościową oraz optymalizacją topologiczną struktury wypełnienia elementów wytwarzanych w technologii FDM.

## Rozdział 4.

### Badania symulacyjne

Rozdział czwarty zawiera opis wykonanych badań symulacyjnych, które obejmowały dobór obciążeń i warunków brzegowych, którym poddany został model bryłowy opracowanego wózka w analizie wytrzymałościowej oraz optymalizacji topologicznej. Analiza wytrzymałościowa dotyczy kilku konfiguracji wypełnienia modeli wytwarzanych w technologii FDM. Dwa skrajne i nieopłacalne technologicznie przypadki przeanalizowane wytrzymałościowo – model skorupowy (pusty w środku) oraz model pełny (100% gęstości wypełnienia) stanowiły odniesienie i porównanie do pozostałych analizowanych przypadków. Najistotniejsze w kontekście wyników badań są wyniki analizy wytrzymałościowej dla modelu, który wypełniony jest regularnym wzorem siatki o gęstości 20% oraz modelu z wypełnieniem wygenerowanym w procesie optymalizacji topologicznej o gęstości 100%, a także syntezy obu tych przypadków – modelu ze strukturą zoptymalizowaną topologicznie, ale o gęstości wypełnienia 20%. Dla wszystkich analizowanych przypadków założone wcześniej parametry wspólne takie jak m.in. grubość ścianki zewnętrznej czy materiał pozostały niezmiennione.

#### 4.1. Metodyka postępowania

Metodyka postępowania obejmuje realizację procesu projektowo-konstrukcyjnego wzbogaconego o zastosowanie optymalizacji topologicznej oraz o uwzględnienie docelowej technologiczności powstałego w wyniku tych działań wytworu. Optymalizacja topologiczna dotyczy wyłącznie struktury wewnętrznej (wypełnienia) modelu, którego zewnętrzna postać geometryczna powinna posiadać zwartą konstrukcję bryłową m.in. z powodu:

- bezpieczeństwa użytkownika - zgodnie z normą PN-EN ISO 11199-2:2021, która dotyczy obiektów rehabilitacyjnych (chodzika) należy unikać otworów konstrukcji o podanym w poniższej tabeli zakresie w celu zabezpieczenia przed utknięciem w nich części ciała użytkownika/opiekuna (Tab. 11)

Tab. 11. Wytyczne do projektowania otworów w konstrukcji wg normy PN-EN ISO 11199-2:2021

Ryzyko utknięcia	Bezpieczny zakres wymiarów otworów konstrukcyjnych	
	Osoby dorosłe	Dzieci



Palców rąk	< 8 mm lub > 25 mm	< 5 mm lub > 12 mm
Stóp	< 35 mm lub > 100 mm	< 25 mm lub > 45 mm
Głowy	< 120 mm lub > 250 mm	< 60 mm lub > 250 mm
Genitaliów	< 8 mm lub > 75 mm	< 8 mm lub > 75 mm

- ekonomii wytwarzania – optymalizacja topologiczna wypełnienia modelu wytworzonego w technologii FDM może przynieść korzyści użytkowe i ekonomiczne (poprzez m.in. minimalizację masy pojazdu, oszczędność zużytego materiału oraz skrócenie czasu pracy urządzeń drukujących);
- wytrzymałości konstrukcji - zachowanie struktury wewnętrznej zostanie przeanalizowane pod względem wytrzymałościowym przy zadanych przypadkach obciążeń w celu sprawdzenia czy optymalizacja topologiczna wypełnienia skutkuje uzyskaniem lepszych własności wytrzymałościowych obiektu w porównaniu do wydruku z wypełnieniem regularnym – sugerowanym przez oprogramowanie urządzenia wytwarzającego (np. wypełnienie typu siatka o gęstości 20%);
- ergonomii i higieny użytkowania – zwarta i opływowa postać skorupy zewnętrznej modeli umożliwi łatwość dezynfekcji i czyszczenia elementów.

## 4.2. Warunki brzegowe i obciążenia

Warunki brzegowe to zespół warunków (np. obciążeń dopuszczalnych, minimalnego współczynnika bezpieczeństwa, itp.), które są stałe i niezmiennie w odpowiednich punktach oraz muszą być spełnione, aby uzyskać rozwiązanie. Wytwory rehabilitacyjne podczas użytkowania nie są z zasady układem statycznym. Przypadki statyczne rozpatrzone zostały dla konkretnych scenariuszy użytkowania, np. kiedy użytkownik pochyla się maksymalnie napinając pasy bezpieczeństwa lub kiedy wózek jest przenoszony za uchwyt, itp. Na podstawie rozpatrywanych przypadków obliczono siły działające na układ, a następnie obciążenia odpowiadające tym siłom zadane zostały w odpowiednim środowisku programowym (Altair Inspire) przeznaczonym do przeprowadzenia analizy wytrzymałościowej oraz optymalizacji topologicznej.

W procesie projektowania obiektu technicznego, w celu weryfikacji jego postaci konstrukcyjnej, uwzględnia się stan jego obciążenia, przyjmując obciążenie miejscowe lub ciągłe, o znanej charakterystyce. Charakterystyki obciążenia rzeczywistego zostają więc uproszczone. Narzędzia umożliwiające przebadanie konstrukcji pod względem stanu obciążenia to m.in. modelowanie geometryczne CAD oraz obliczenia wytrzymałościowe MES. Z reguły nie jest możliwe dokładne określenie wszystkich możliwych obciążeń użytkowych konstrukcji, poza tym metody obliczeniowe cechuje pewien błąd, materiały nie są idealnie jednorodne, a ich parametry cechuje pewien rozrzut, mogą także wystąpić niedokładności związane z technologią wykonania (FDM), a elementy ulegają zużyciu itp. W normie PN-EN 12183:2014 [96], która dotyczy metod badań standardowych wózków inwalidzkich zalecana wartość współczynnika bezpieczeństwa przyjęta do obliczeń wynosi  $\gamma = 1,5$ . Z wymienionych wcześniej powodów do obliczeń zdecydowano o przyjęciu współczynnika bezpieczeństwa o dwukrotnie wyższej wartości niż we wspomnianej normie ( $\gamma = 3$ ), który przede wszystkim uwzględnia wpływ obciążeń przewidywanych i przypadkowych, spiętrzenia naprężeń, czy zmęczenia materiału oraz anizotropowość wydruków w technologii FDM [8]. Do każdego zestawu obciążeń przyjęto dane wejściowe dla maksymalnej masy dopuszczalnej użytkownika ( $m_u = 20$  kg) oraz masę prototypu urządzenia ( $m_p = 5$  kg).

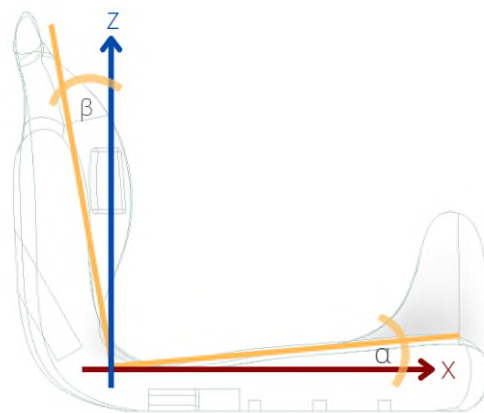
#### 4.2.1. Rozpatrywane przypadki obciążeń

##### Nacisk na siedzisko

Siła  $F_1$  działająca na powierzchnię siedziska – na podstawie badań eksperymentalnych oraz analizowanych przykładów z literatury [87] założono, że siła ta wywierana jest przez ok. 85% masy użytkownika.

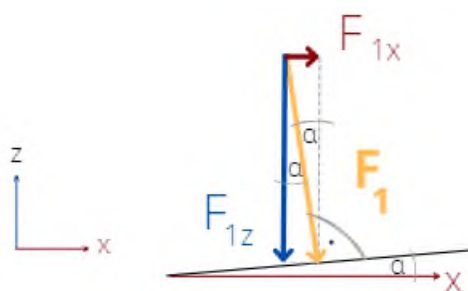
$$F_1 = 85\% * m_u * g = 0,85 * 20 * 10 \\ = 170 \text{ N}$$

Siła działa prostopadle do powierzchni siedziska - w płaszczyźnie ZX. Siedzisko



Rys. 89. Odchylenie podnóżka od płaszczyzny poziomej i pionowej

odchylone jest względem płaszczyzny YX o kąt  $\alpha = 5^\circ$ .



Rys. 90. Rozkład siły działającej na siedzisko na składowe

$$F_{1x} = F_1 * \sin\alpha = 170 \text{ N} * 0,0872 = 14,8 \text{ N}$$

$$F_{1z} = F_1 * \cos\alpha = 170 \text{ N} * 0,9962 = 169,4 \text{ N}$$

### Nacisk na podnózek

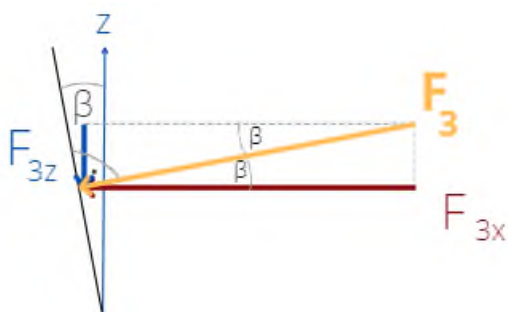
Siła  $F_2$  działająca na powierzchnię podnóżka – obliczona została ze wzoru zalecanego do badania wytrzymałości podnóżków wózków rehabilitacyjnych według normy PN-EN 12183:2014 – 07 [96]. Siła wywierająca nacisk na podnózek przyłożona jest prostopadłe do jego powierzchni w płaszczyźnie ZY.

$$F_2 = 12,5\% * m_u * g = 0,125 * 20 * 10 = 25 \text{ N}$$

### Nacisk na oparcie

Siła  $F_3$  działająca na powierzchnię oparcia – dobrana została eksperymentalnie oraz na podstawie literatury [87] jako siła wywierana przez ok. 15% masy ciała użytkownika prostopadłe do powierzchni oparcia, które nachylone jest względem płaszczyzny ZY pod kątem  $\beta=10^\circ$ .

$$F_3 = 15\% * m_u * g = 0,15 * 20 * 10 = 30 \text{ N}$$



$$F_{3x} = F_3 * \cos\beta = 30 \text{ N} * 0,4226 = 12,7 \text{ N}$$

$$F_{3z} = F_3 * \sin\beta = 30 \text{ N} * 0,9848 = 29,5 \text{ N}$$

Rys. 91. Rozkład siły działającej na oparcie na składowe

### Nacisk na otwór montażowy uchwytu do pchania pojazdu

Siła pchania  $F_4$  wymagana jest do ruszenia i utrzymywania obciążonego wózka w ruchu (przez opiekuna) ze stałą prędkością na płaskiej powierzchni. Według normy PN-EN 12183:2014 – 07 [96] dla tradycyjnych wózków inwalidzkich napędzanych ręcznie siła ta nie powinna przekraczać wartości 40 N dla masy użytkownika < 100 kg. Siła powinna zostać przyłożona poziomo w kierunku jazdy do przodu wzdłuż osi wzdłużnej wózka lub do uchwytów do pchania jeśli występują.



Rys. 92. Siła  $F_4$  wywołana przez pchanie wózka z użytkownikiem

Siła  $F_4$  potrzebna do pchania wózka ruchem jednostajnym po torze poziomym równoważona jest przez siłę tarcia tocznego kół o podłoże.

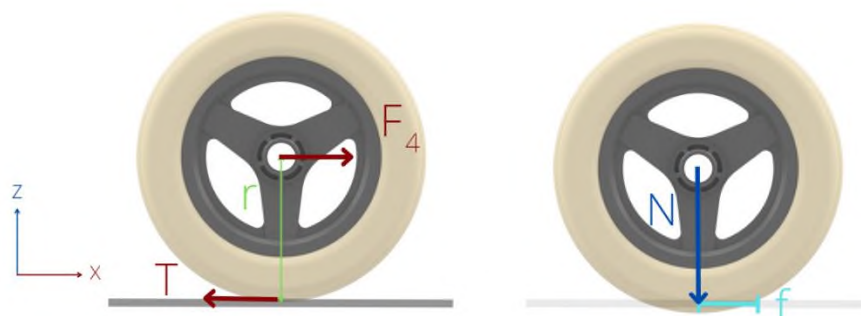
$$F_4 = T$$

Masa pojazdu wraz z użytkownikiem wynosi  $m = m_u + m_p = 25$  kg. Zakładając, że pojazd był nieruchomy uwzględniono też współczynnik tarcia tocznego kół o podłoże (guma-beton)  $f=35$  mm. Przyjęta do obliczeń średnica zewnętrzna koła  $d = 250$  mm.

Promień  $r = 125$  mm.

Siła nacisku ciała na podłoże  $N$  działająca na 1 koło przyjęta została jako połowa ciężaru wózka z użytkownikiem.

$$N = \frac{1}{2}Q = \frac{1}{2} * (m_p + m_u) * g = \frac{1}{2} * 25 \text{ kg} * 10 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 125 \text{ N}$$



Rys. 93. Siły działające na koło wózka – tarcie toczne

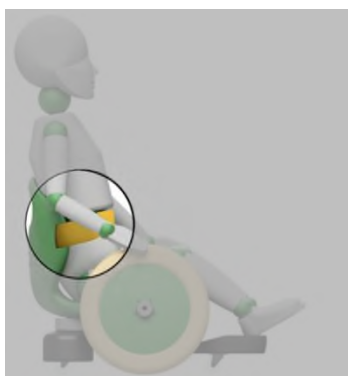
Jednostajne toczenie oznacza także, że suma momentów sił względem dowolnego punktu jest równa zero. Z równowagi momentów sił zilustrowanych na Rys. 93 względem środka koła wynika, że siła tarcia wynosi:

$$T * r = N * f$$

$$T = \frac{N * f}{r} = \frac{125\text{N} * 35 \text{ mm}}{125 \text{ mm}} = 35 \text{ N}$$

#### Nacisk wywierany na otwory montażowe pasa bezpieczeństwa

Siła  $F_5$  działająca na otwory montażowe pasu bezpieczeństwa pochodzi od naciągu pasa przez pochylającego się użytkownika. Siła działająca na pas wywierana jest przez 25% masy ciała użytkownika. Siła ta działa w płaszczyźnie XY.



$$2F_5 = 25\% * m_u * g$$

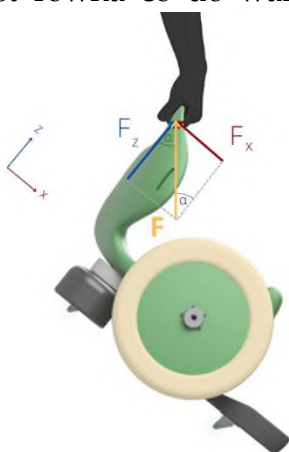
$$2F_5 = 0,25 * 20 \text{ kg} * 10 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 50 \text{ N}$$

Przyjęto, że na każdy otwór działa siła 25 N.

Rys. 94. Mocowanie pasa bezpieczeństwa

#### Nacisk wywierany na uchwyt siedziska przy przenoszeniu wózka

Siła  $F_6$  działająca na uchwyt siedziska przy przenoszeniu pojazdu przez opiekuna jest równa co do wartości ciężarowi pojazdu. Ze względów bezpieczeństwa pojazd przenoszony może być tylko i wyłącznie bez posadzonego w nim użytkownika. Kąt przyłożenia siły wynosi  $\alpha = 40^\circ$  i odpowiada nachyleniu osi Z wózka do kierunku siły grawitacji.



Rys. 95. Przenoszenie pojazdu

$$F_6 = Q = m_p * g$$

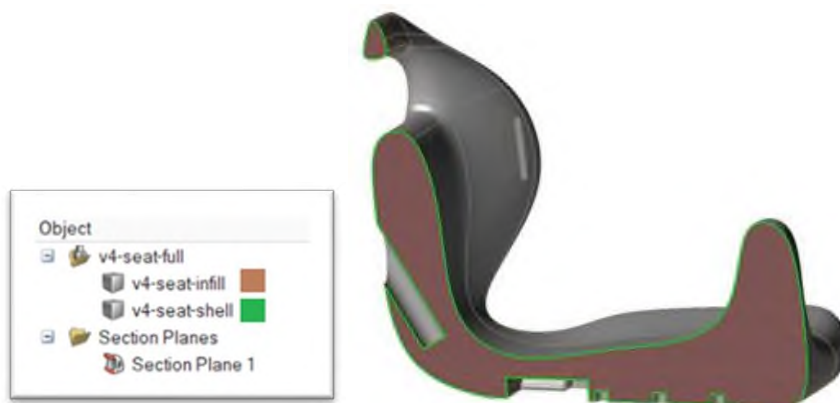
$$F_6 = 5 \text{ kg} * 10 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 50 \text{ N}$$

$$F_{6x} = F_6 * \sin \alpha = 50 \text{ N} * 0,6428 = 32,14 \text{ N}$$

$$F_{6z} = F_6 * \cos \alpha = 50 \text{ N} * 0,766 = 38,3 \text{ N}$$

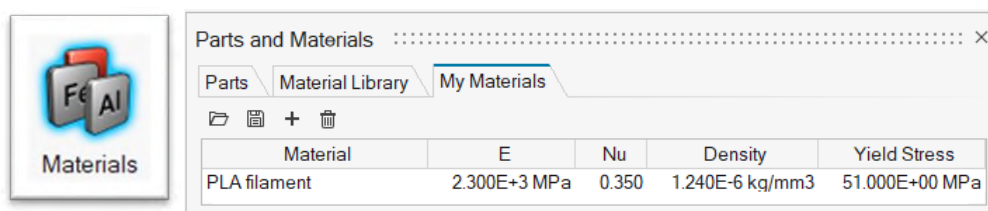
#### 4.2.2. Analiza wytrzymałościowa i optymalizacja topologiczna

Badania symulacyjne obejmowały przygotowanie oraz wyeksportowanie modeli bryłowych reprezentowanych w formacie STEP, które przetwarzane są przez oprogramowanie Altair Inspire, w którym przeprowadzona została optymalizacja topologiczna. Oprogramowanie Altair Inspire wykorzystuje silnik OptiStruct do przeprowadzania analizy strukturalnej i wytrzymałościowej, a do procesu optymalizacji topologicznej wykorzystywana jest w nim metoda SIMP opisana wcześniej (patrz podrozdział: 2.3). Format pliku STEP (ang. *Standard for the Exchange of Product Data*), znany również jako standard ISO 10303, używany jest najczęściej do drukowania i modelowania 3D. Pliki w formacie STEP odczytują i zapisują pełną treść modelu 3D (a więc nie tylko podstawowe elementy geometryczne), co jest niezbędne do osiągnięcia wysokiego poziomu dokładności wyników analizy [40]. Każdy z analizowanych elementów wózka został skomponowany z 2 brył: bryły skorupy zewnętrznej o grubości 2,4 mm (bądź 2 mm, w zależności od miejsca) oraz bryły wypełnienia. Bryła wypełnienia została oznaczona w oprogramowaniu Altair Inspire jako obszar projektowy (ang. *design space*), który podlega optymalizacji topologicznej.



Rys. 96. Przekrój modelu składającego się z dwóch brył: wypełnienie (obszar brązowy) oraz skorupa (obszar zielony)

Do biblioteki materiałów dodany został *filament PLA* oraz jego właściwości (Rys. 97), a następnie materiał ten został przypisany do każdej bryły modelu (Rys. 98).

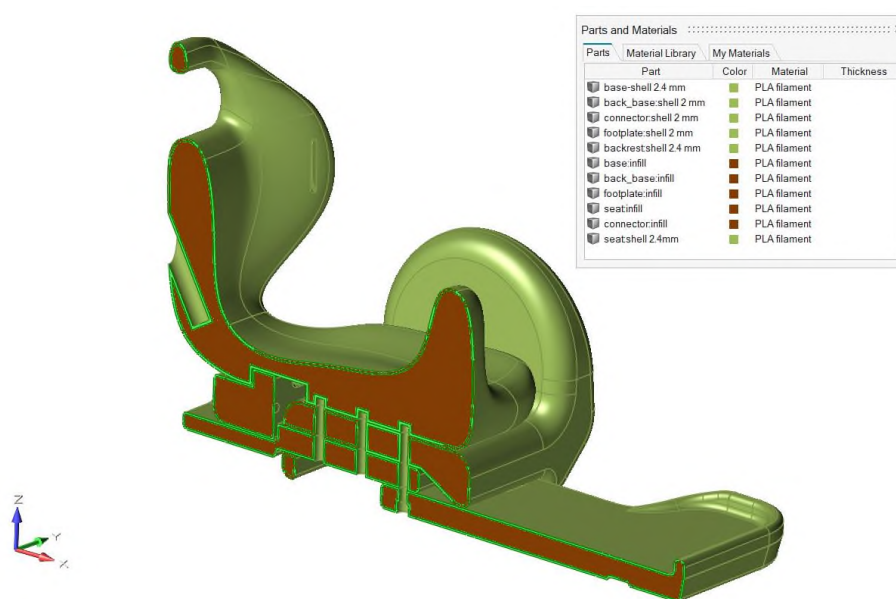


Rys. 97. Manualne zdefiniowanie i przypisanie nowego materiału do biblioteki Altair Inspire

Właściwości fizyczne opisane w tabeli dotyczą:

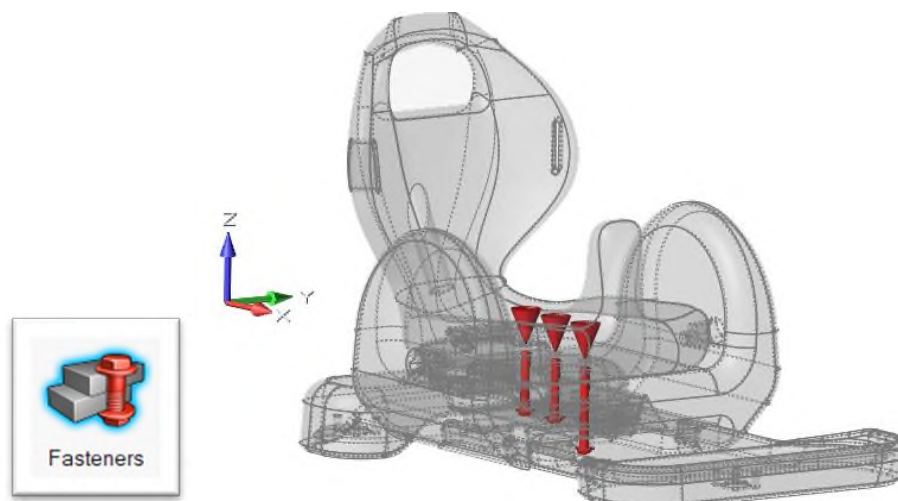
- Moduł Younga  $E$  - wielkość określająca sprężystość materiału przy rozciąganiu i ściskaniu. WGPa została dobrana według karty charakterystyki dla filamentu Prusa PLA [59].
- Współczynnik Poissona  $\nu$  - stosunek odkształcenia poprzecznego do odkształcenia podłużnego przy jednoosiowym stanie naprężenia [36]. Współczynnik Poissona dla filamentu PLA nie jest wartością stałą i może zmieniać się w zależności od wielu czynników takich jak np. temperatura otoczenia, wilgotność powietrza, ustawione parametry druku itp. Zazwyczaj jednak przyjmuje się jego wartość w zakresie między 0,35 a 0,4 [36].
- Gęstość  $\rho$  (ang. *Density*) - czyli stosunek masy pewnej ilości substancji do zajmowanej przez nią objętości. Na podstawie karty technicznej filamentu Nebula [58] wartość ta wynosi 1,24 g/cm<sup>3</sup>.
- Granica sprężystości (ang. *Yield Stress*) - naprężenie, po przekroczeniu którego ciało nie powraca do pierwotnego kształtu po usunięciu obciążenia. Na podstawie danych z karty charakterystyki filamentu Prusa PLA przyjęto wartość granicy sprężystości jako 51 MPa [59].

Należy wziąć pod uwagę, że elementy drukowane w technologii FDM posiadają różne właściwości w zależności od kierunku druku warstw (anizotropowość), np. niższa wytrzymałość na rozciąganie występuje wzdłuż warstw wydruku niż w poprzek [121]. Z tego powodu do obliczeń wytrzymałościowych przyjęto niższe wartości granicy wytrzymałości [59].



Rys. 98. Przypisanie materiału do każdej bryły złożenia

Następnie w miejsce otworów montażowych wstawione zostały śruby za pomocą opcji *Połączenia* (ang. *fasteners*). Podczas definiowania połączeń śrubowych można symulować obecność śrub i wkrętów, które będą traktowane jako dodatkowe podpory w analizie wytrzymałościowej i zapobiegną przesuwaniu się elementów (Rys. 99).



Rys. 99. Wstawienie automatycznych połączeń w miejsce otworów montażowych

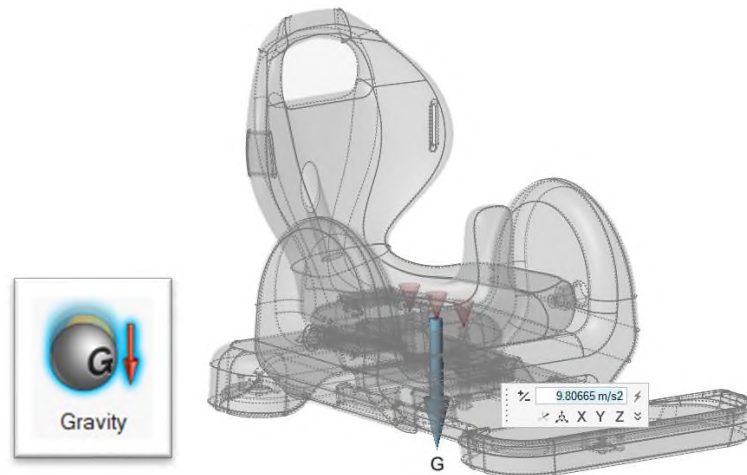
Kolejnym krokiem było wykorzystanie symetrii optymalizowanego modelu i zastosowanie jednej z opcji kontroli kształtu (ang. *shape controls*). Płaszczyzna symetrii została włączona zarówno do bryły skorupy, a także wypełnienia modelu (Rys. 100). Zastosowanie płaszczyzny symetrii przy optymalizacji topologicznej skraca czas procesu.



Rys. 100. Wykorzystanie płaszczyzny symetrii modelu

Kolejnym etapem było ustawienie kierunku działania siły grawitacji – wzdłuż osi Z oraz jej wartości  $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ . Włączenie siły grawitacji umożliwia uwzględnienie ciężaru własnego optymalizowanego elementu w analizie wytrzymałościowej czy optymalizacji topologicznej (Rys. 101).

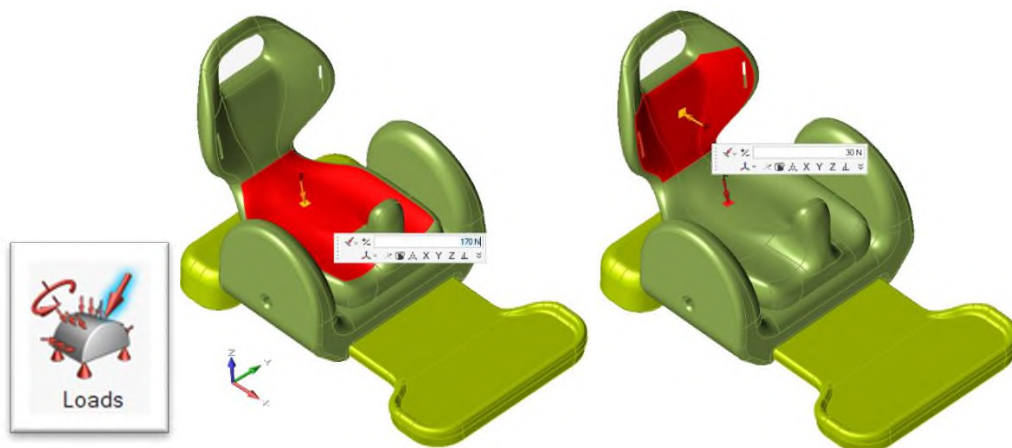




Rys. 101. Uwzględnienie ciężaru modelu przy analizie

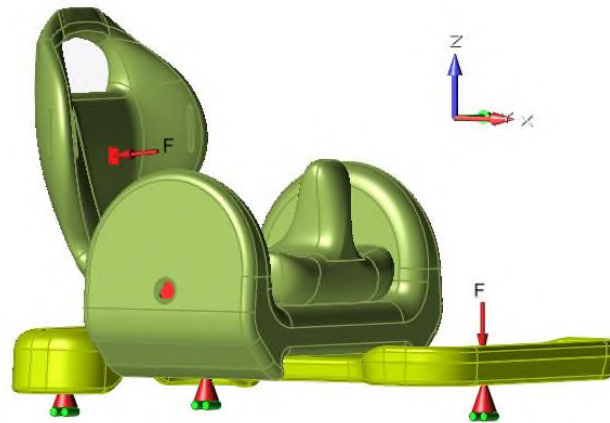
Następnym etapem optymalizacji topologicznej jest zadanie odpowiednich przypadków obciążeń (ang. *Load Cases*) działających na element (Rys. 102). Wśród rodzajów obciążeń, które mogą zostać zadane w punkcie, na krawędzi lub na danej powierzchni elementu wyróżnić można:

- ciśnienie (ang. *pressure*) - oddziałuje na ciało stałe prostopadle w kierunku do wewnątrz albo na zewnątrz danej powierzchni [Pa];
- siłę (ang. *force*) – działa na punkt, krawędź lub powierzchnię w jednym, określonym kierunku [N];
- moment skręcający (ang. *torque*) – siła skręcająca działająca wokół osi obrotu, może być przyłożona do danej powierzchni lub środka otworu [N\*m].



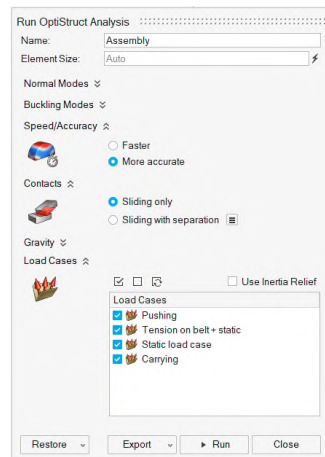
Rys. 102. Siły działająca na powierzchnię siedziska i oparcia

Ponadto w miejscu otworów montażowych osi kół oraz śrub mocujących kółka obrotowe wstawione zostały podpory stałe i przesuwne (Rys. 103).



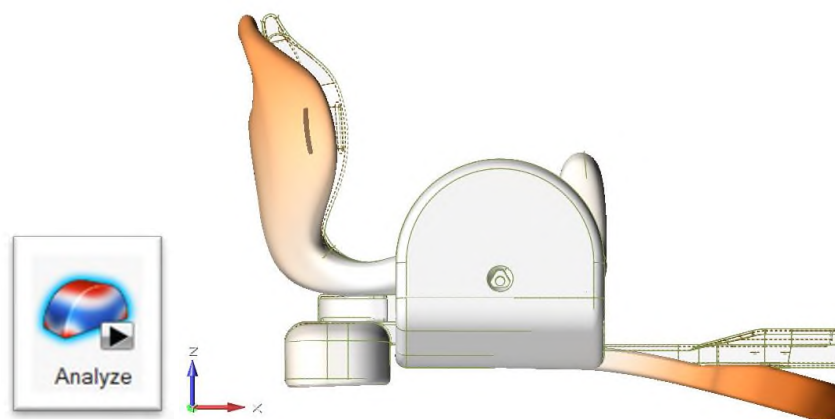
Rys. 103. Statyczny przypadek obciążenia wraz z podporami

Przed przeprowadzeniem procedur związanych z optymalizacją topologiczną konieczne jest wykonanie analizy wytrzymałościowej pełnego modelu siedziska, w celu sprawdzenia, czy model jest prawidłowo zaprojektowany (Rys. 104). Przeprowadzenie analizy wytrzymałościowej elementu skutkuje skróceniem czasu optymalizacji topologicznej o identyczne dla niej kroki.



Rys. 104. Okno analizy wytrzymałościowej wraz z wyborem przypadków obciążeń działających na złozenie

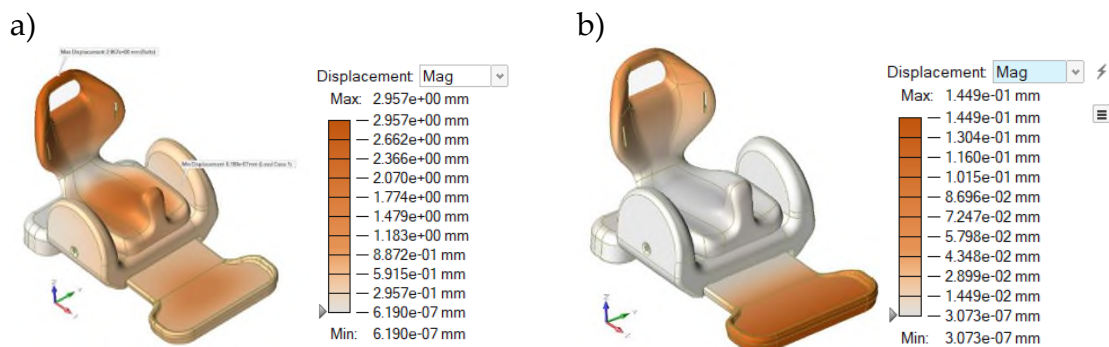
Analizując model dla każdego przypadku obciążenia, można sprawdzić, czy model ugina się w logiczny (przewidywany) sposób. Nietypowe zachowanie jest zwykle wynikiem nieprawidłowo zdefiniowanych obciążeń i/lub podpór (Rys. 105). Obraz przedstawionego zachowania analizowanych elementów pod wpływem obciążeń jest przeskalowany i nie odzwierciedla rzeczywistych wartości odkształceń, a jedynie wskazuje obszary narażone na największe odkształcenia.



Rys. 105. Animacja zachowania modelu pod wpływem zadanych obciążeń

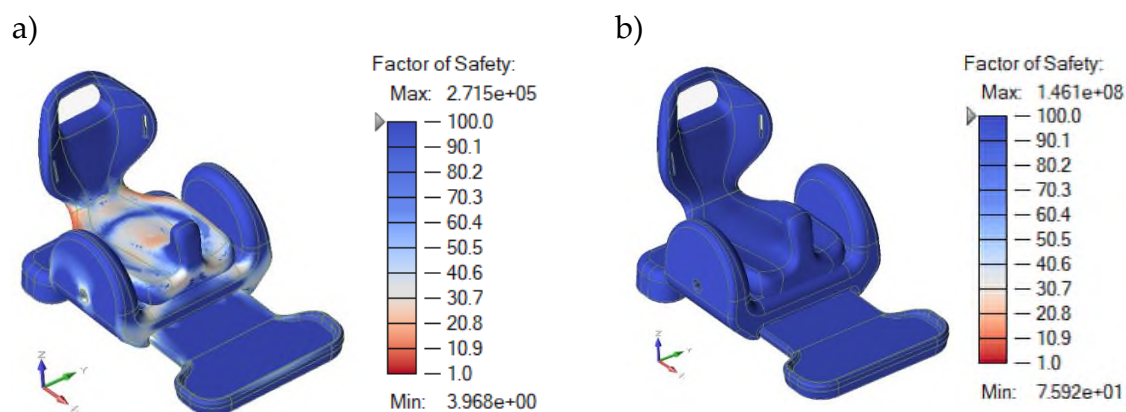
Wyniki analizy wytrzymałościowej przeprowadzonej w oprogramowaniu Altair Inspire dla analizy złożenia pełnego modelu (z wypełnieniem 100%) pod wpływem zestawu obciążeń są przedstawione na Rys. 106 - Rys. 108. Dodatkowo do porównania wyników przeprowadzona została analiza modelu wyłącznie skorupowego (bez wypełnienia), której wyniki zestawione zostały z wynikami analizy wytrzymałościowej modelu pełnego na poniższych ilustracjach. Oba analizowane modele są nieopłacalne technologicznie w kontekście wytwarzania za pomocą technologii FDM, jednak wyniki analizy wytrzymałościowej dla modeli bryłowych (złożenia modeli skorupowych oraz pełnych) skrajnych pod względem konstrukcyjnym stanowią odniesienie do porównania wszystkich wyników prowadzonych badań.

Rys. 106 obrazuje mapy maksymalnych odkształceń obszarów elementów składowych pod wpływem działających obciążeń. Typ wyniku odkształceń obrazuje w jaki sposób model odkształci się, gdy zastosowane zostaną zadane wcześniej obciążenia i podpory. Obszary modelu zabarwione najciemniej wykazują ryzyko wystąpienia największych odkształceń. Pełny model wykazywał bardzo wysoką wytrzymałość na wszystkie przypadki zadanych obciążeń. Maksymalne odkształcenie modelu pełnego wynosiło ok. 0,15 mm, natomiast maksymalne odkształcenie modelu skorupowego sięgało niemal 3 mm i występowało w obszarze oparcia. Analizując mapę odkształceń modelu skorupowego (Rys. 106a) można zauważyć, że obszary najbardziej narażone na odkształcenie to centralne obszary podnóżku i siedziska oraz oparcie.



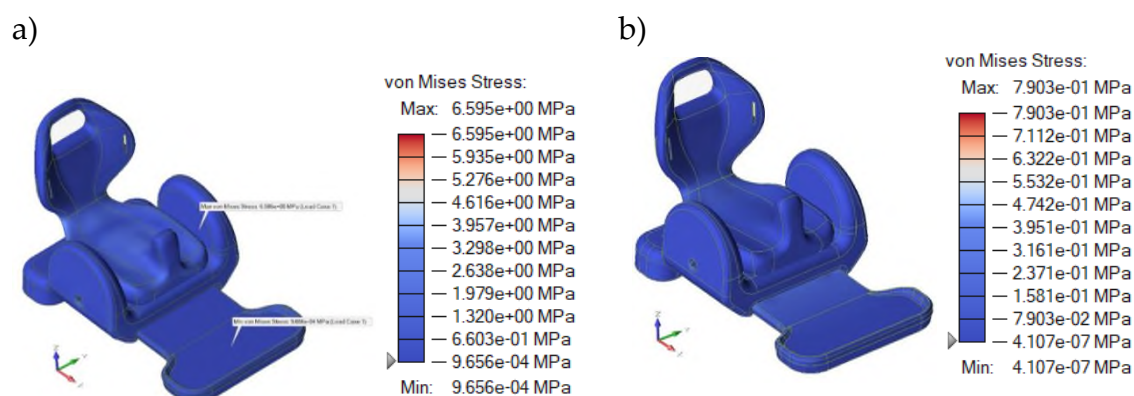
Rys. 106. Maksymalne odkształcenia a) modelu skorupowego b) modelu z wypełnieniem 100%

Na Rys. 107 porównane zostały współczynniki bezpieczeństwa dla modeli skorupowego i modelu pełnego. Współczynnik bezpieczeństwa jest wartością liczbową bezwymiarową, która informuje, ile razy naprężenie dopuszczalne dla danej konstrukcji jest mniejsze od naprężenia granicznego. Wartości zbliżone do liczby „1” oznaczają obszary potencjalnie najbardziej narażone na zniszczenie. Skala legendy analizy została przedstawiona w zakresie wartości 1-100, przy czym na modelu pełnym praktycznie nie można dostrzec przebarwień struktury, a najniższa wartość współczynnika bezpieczeństwa wynosi ponad 75 jednostek, co stanowi bardzo wysoki wynik i wskazuje na przewymiarowanie elementów składowych (przy przyjętym założeniu 100% wypełniania). Wysoki współczynnik bezpieczeństwa modelu pełnego jest również podstawą odniesienia do dalszych kroków – optymalizacji topologicznej. Na Rys. 107a można dostrzec wiele newralgicznych obszarów narażonych na zniszczenie, jednak biorąc pod uwagę minimalny współczynnik bezpieczeństwa na poziomie niemal 4 jednostek można założyć, że nawet sama skorupa mogłaby wytrzymać założone obciążenia statyczne. Analizując wartości współczynnika bezpieczeństwa konstrukcji należy wziąć pod uwagę, że docelowa technologia wytwarzania – FDM powoduje anizotropowość materiału, którego właściwości zmieniają się w zależności od kierunku działania sił w stosunku do kierunku wydruku warstw. Poza tym przyjęte obciążenia są wyłącznie statyczne i ograniczają się do kilku możliwych przypadków, co w rzeczywistości nie występuje (urządzenia rehabilitacyjne przy użytkowaniu przenoszą różne obciążenia dynamiczne), dlatego w dalszych badaniach należy dążyć do zwiększenia minimalnej wartości współczynnika bezpieczeństwa konstrukcji.



Rys. 107. Minimalny współczynnik bezpieczeństwa modelu a) skorupowego b) z wypełnieniem 100%

Na Rys. 108 przedstawione są mapy naprężeń zredukowanych von Misesa dla przypadku modelu skorupowego oraz z wypełnieniem o gęstości 100%. Maksymalna wartość naprężeń zredukowanych dla modelu skorupowego wynosi ok. 6,6 MPa, natomiast dla modelu pełnego naprężenia te wynoszą zaledwie 0,8 MPa. Porównując te wartości do granicy plastyczności filamentu PLA wskazanego przez producentów (patrz: Tab. 5), która wynosi ok. 51 MPa można uznać, że wydruki modeli skorupowych powinny wytrzymać zadane obciążenia statyczne.



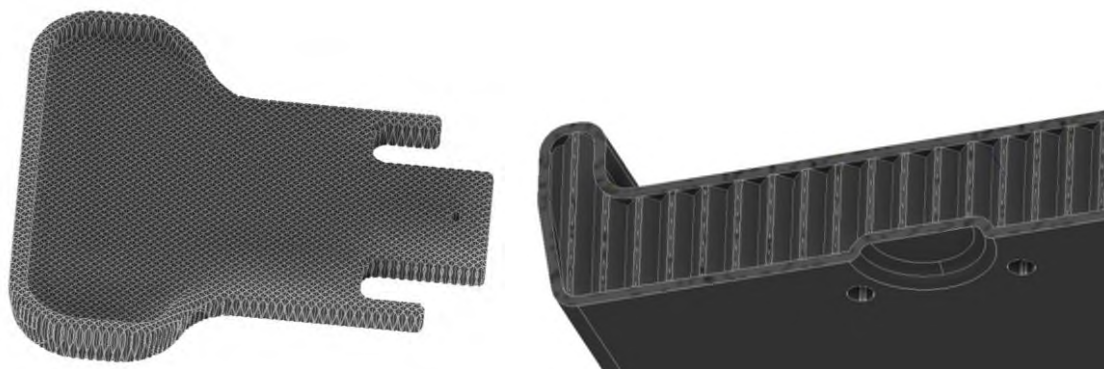
Rys. 108. Mapy naprężeń zredukowanych von Misesa dla modelu a) skorupowego oraz b) z wypełnieniem 100%

Biorąc pod uwagę nieopłacalność technologiczną analizowanych modeli, do porównania pod względem wytrzymałości przeanalizowany został także model z wypełnieniem standardowym – generowanym przez Slicer Ultimaker Cura typu grid o przyjętej gęstości 20% oraz o zdefiniowanej grubości ścianki – 2,4 mm (siedzisko, baza) oraz 2 mm (podnózek, łącznik, baza tylnych kółek) - dla tych samych przypadków obciążeń. Model wypełnienia został zamodelowany manualnie, odtwarzając wzór wypełnienia automatycznie generowanego przez wspomniany slicer (Rys. 109).



Rys. 109. Analiza modelu z wypełnieniem typu grid o gęstości 20%

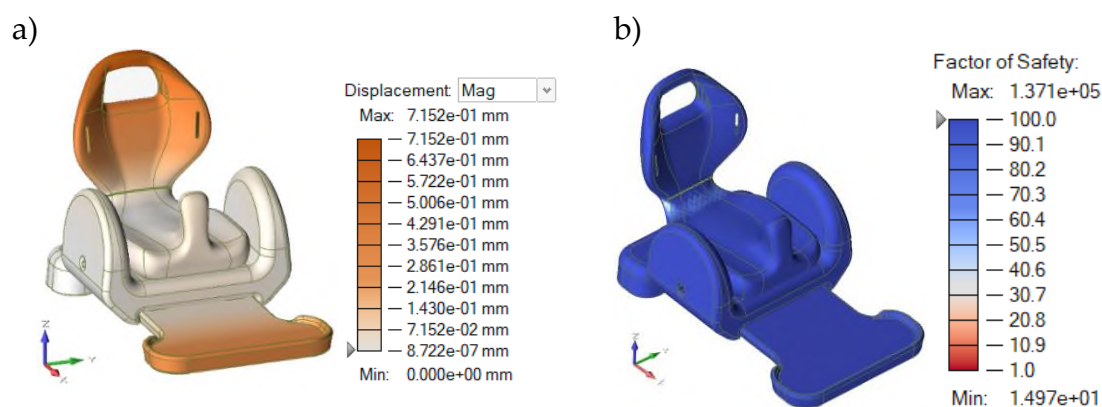
Analiza modelu bryłowego z wypełnieniem została przeprowadzona w oprogramowaniu Altair Inspire. Utworzenie modelu bryłowego z wypełnieniem kontrolowanym było wyjątkowo pracochłonnym procesem i wymagało przeprowadzenia szeregu składowych operacji modelowych. Model z wypełnieniem kontrolowanym typu grid o gęstości 20% musiał zostać ponownie zamodelowany w oprogramowaniu typu CAD, a następnie zaimportowany do oprogramowania Altair Inspire w celu przeprowadzenia analizy wytrzymałościowej w tym samym środowisku. Podczas tych operacji dostrzeżony został kolejny problem – braku narzędzi, które umożliwiają użytkownikom oprogramowania przeznaczonego do druku FDM (tzw. Slicerów) konwersję G-codu z zapisaną informacją o wybranym typie i gęstości wypełnienia do formatu np. STL czy STEP. Po podjęciu wielu prób eksportu G Codu i plików STL z oprogramowania Ultimaker Cura oraz Voxelizer, a następnie ich konwersji do plików STL lub STEP w systemach typu: SolidWorks, NX, CATIA nie udało się uzyskać odpowiedniego modelu z zapisaną strukturą wypełnienia wygenerowanego przez slicer. Z tego właśnie powodu zdecydowano o „manualnym” zamodelowaniu siatki standardowej typu grid o gęstości 20% analizując obraz generowany przez Slicer na warstwach modelu oraz parametry drukarki. Modelowanie ręczne siatki wymagało użycia kilku dodatkowych operacji boolowskich na bryłach modeli pełnych oraz skorupy.



Rys. 110. Model siatkowy wypełnienia podnóżka (po lewej) i model połączony skorupy i wypełnienia (po prawej)

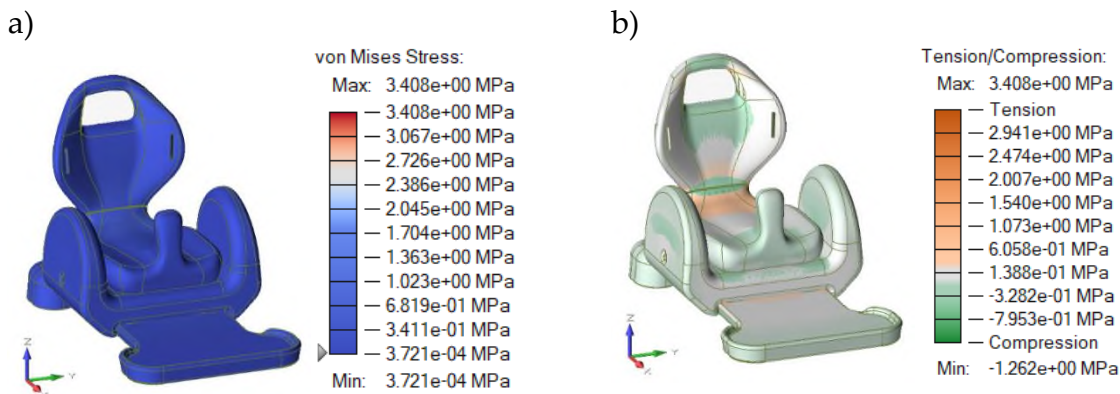
Ostateczny model bryłowy złożenia wózka z zamodelowanym wypełnieniem i skorupą został wyeksportowany do formatu STEP, co przy importowaniu do środowiska Altair Inspire przysporzyło kolejnych problemów związanych z poziomem skomplikowania modelu i jego poprawnym importem w to środowisko, jednak ostatecznie model został zaimplementowany oraz przeanalizowany z powodzeniem.

Wszystkie wyniki analizy odkształceń i naprężeń modelu z wypełnieniem typu siatka o gęstości 20% dotyczyły złożonego stanu naprężeń. Na poniższych ilustracjach przedstawiono wybrane mapy odkształceń i naprężeń oraz współczynnik bezpieczeństwa analizowanego modelu (Rys. 111).



Rys. 111. A) Maksymalne odkształcenia b) współczynnik bezpieczeństwa modelu z wypełnieniem 20% typu grid

Maksymalne odkształcenie modelu z wypełnieniem typu grid o gęstości 20% wynosiło ok. 0,7 mm, co jest stosunkowo dobrym wynikiem i świadczy o sztywności analizowanej konstrukcji. Minimalny współczynnik bezpieczeństwa dla modelu wynosił niecałe 15 jednostek, co również stanowi dobry wynik w porównaniu do założonych wartości (min. wsp. bezpieczeństwa = 3). Na Rys. 112 przedstawione zostały mapa naprężeń zredukowanych oraz mapa obszarów ściskanych i rozciąganych analizowanego modelu.



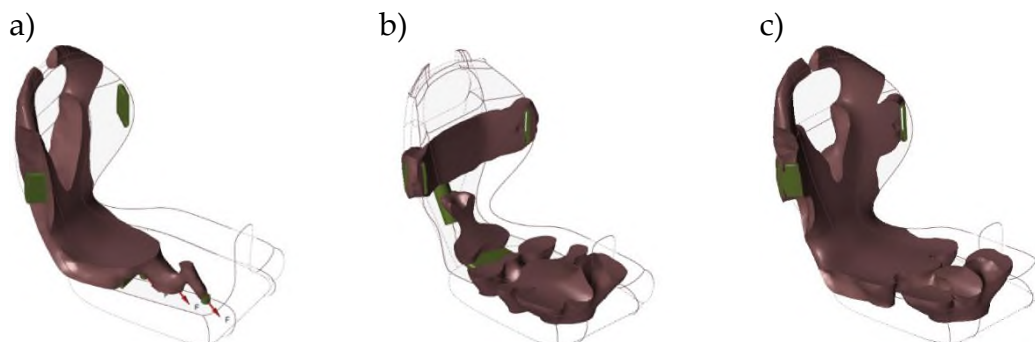
Rys. 112. Mapy a) naprężeń zredukowanych, b) obszarów ściskanych (zielony) i rozciąganych (pomarańczowy)

Maksymalne naprężenia zredukowane von Misesa wynoszą 3,4 MPa. Najbardziej rozciągane obszary wózka występują w obszarze oparcia – szczególnie w obszarze przewężenia i połączenia oparcia z siedziskiem, natomiast najbardziej ściskane obszary wózka pod wpływem działania założonych obciążeń to m.in. krańce podnóżka oraz obszar mocowania kół do bazy i okolice uchwytu siedziska. Wyniki analizy wytrzymałościowej (a więc uzyskana informacja o pewnym naddatku wytrzymałości oraz współczynnika bezpieczeństwa) stanowią podstawę do przeprowadzenia optymalizacji topologicznej wypełnienia poszczególnych elementów wózka, wykonania analizy wytrzymałościowej postaci zoptymalizowanych, a następnie porównania uzyskanych wyników analizy wytrzymałościowej.

Proces optymalizacji topologicznej może być przeprowadzany dla każdego przypadku obciążenia osobno. Ponadto zmieniając różne kryteria (np. cel optymalizacji topologicznej: minimalizacja masy, zachowanie sztywności itp.) można osiągnąć różne wyniki końcowe wirtualnej postaci struktury zoptymalizowanej. Trzeba na tym etapie podkreślić, że optymalizacja topologiczna jest zautomatyzowanym procesem projektowym, a jej wyniki dla tego samego zestawu obciążeń i warunków brzegowych mogą przedstawiać szereg poprawnych programowo rozwiązań, z których nie można wyróżnić jednego właściwego [76]. Ponadto w oprogramowaniu Altair Inspire można analizować poszczególne modele osobno bądź całe złożenie. Przykład optymalizacji topologicznej poszczególnych przypadków obciążeń oraz przypadku złożonego przedstawiony został na Rys. 113. Rys. 113a obrazuje wynik optymalizacji topologicznej wypełnienia siedziska dla przypadku przenoszenia go za uchwyt, natomiast Rys. 113b przedstawia wynik optymalizacji topologicznej dla przypadku, w którym użytkownik siedzi obciążając powierzchnię siedziska i pochyla się naciągając pas bezpieczeństwa. Na Rys. 113c przedstawiony jest wynik optymalizacji dla złożonego przypadku



obciążeń – struktury siedziska, która powinna wytrzymać każdy z zadanych przypadków zestawu sił.

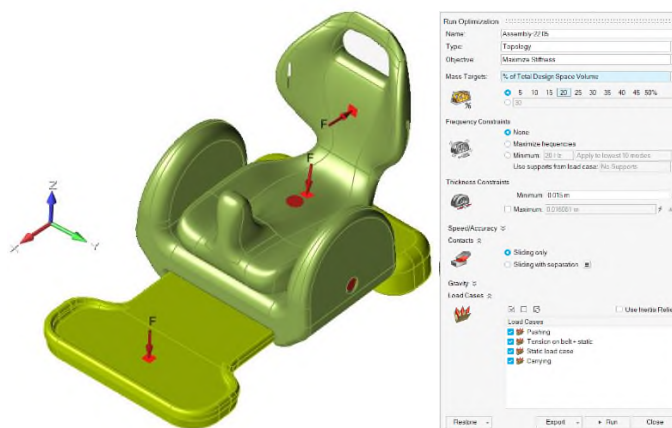


Rys. 113. Przykładowa optymalizacja topologiczna wypełnienia siedziska: a) przypadek przenoszenia siedziska za uchwyt, b) przypadek obciążenia statycznego siedziska i naciągnięcia pasów bezpieczeństwa, c) przypadek złożony

W ten podobny sposób analizowane jest całe złożenie wózka dla dzieci, przy uwzględnieniu wszystkich czterech obliczonych wcześniej zestawów obciążeń (ang. *Load Cases*):

1. Statyczne obciążenie – użytkownik siedzi i opiera się obciążając siedzisko, oparcie i podnózek.
2. Obciążenie pasów – użytkownik pochyla się naciągając pasy obciążając siedzisko i podnózek.
3. Pchanie obciążonego wózka – opiekun pcha wózek z posadzonym w nim użytkownikiem.
4. Przenoszenie pustego wózka za uchwyt siedziska.

Ponadto w otworach montażowych kół, którymi porusza użytkownik umieszczone są podpory stałe imitujące koła zahamowane, natomiast w miejscu blaszki montażowej kółek obrotowych umieszczone są podpory ruchome. Cel (ang. *mass target*) optymalizacji topologicznej został ustawiony na obniżenie masy i zachowanie sztywności konstrukcji poprzez zminimalizowanie objętości zaznaczonego obszaru projektowego (wypełnienia modeli) do 20% objętości początkowej (Rys. 114).



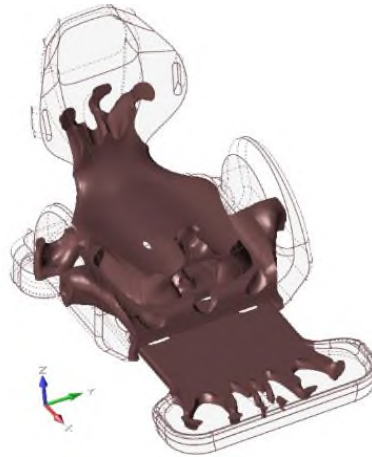
Rys. 114. Okno uruchomienia procesu optymalizacji topologicznej

Proces optymalizacji topologicznej dla złożenia (kilku modeli połączonych ze sobą więzami) wydłuża się znacząco w porównaniu do optymalizacji topologicznej pojedynczego elementu. Wpływ na to mają także parametry sprzętowe, aczkolwiek należy wziąć pod uwagę, że pojedynczy proces obliczeniowy może trwać nawet do kilku, a nawet kilkunastu godzin, w zależności od poziomu skomplikowania modelu (Rys. 115).

Run History 2993.15 MB						
	Name	Model	Status	Completed	Size	Elapsed
	Assembly_	Assembly_	✓	06/12/2023 15:36:20	686.07 MB	03:05:23
	Assembly_	Assembly_	✓	06/07/2023 14:22:46	342.88 MB	00:01:55
	Assembly_	Assembly_	✓	06/07/2023 14:16:38	335.75 MB	00:39:21
	Assembly_	Assembly_	✓	06/07/2023 12:34:16	386.38 MB	00:01:44
	Assembly_	Assembly_	✓	05/26/2023 16:03:20	407.27 MB	01:07:11
	Assembly_	Assembly_	✓	05/23/2023 15:31:30	834.81 MB	04:10:27

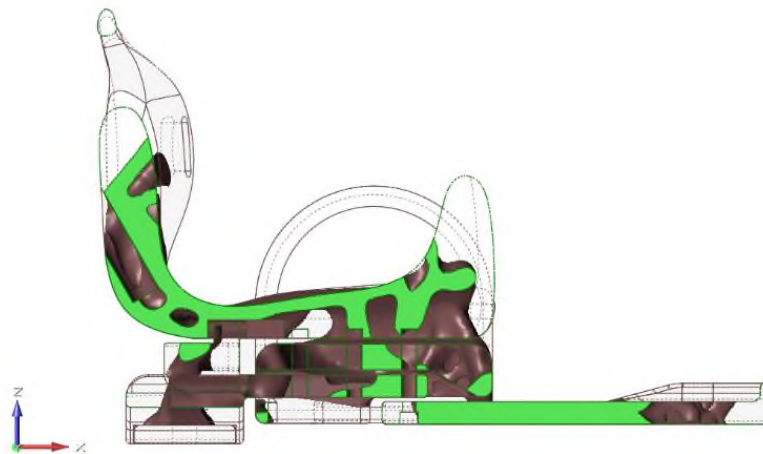
Rys. 115. Przykładowa historia zakończonych z powodzeniem procesów optymalizacji topologicznej i analizy wytrzymałościowej

Wynik optymalizacji topologicznej jest modelem teoretycznym, który należy przekonwertować do postaci modelu bryłowego np. za pomocą opcji PolyNURBS. Analizując model teoretyczny można dowolnie włączać i wyłączać widoczność poszczególnych brył całego modelu. W celu większej przejrzystości na ilustracjach przedstawionych poniżej wyłączona została skorupa modeli (która nie podlegała optymalizacji), a ilustracje przedstawiają jedynie zoptymalizowaną strukturę wypełnienia (Rys. 116).



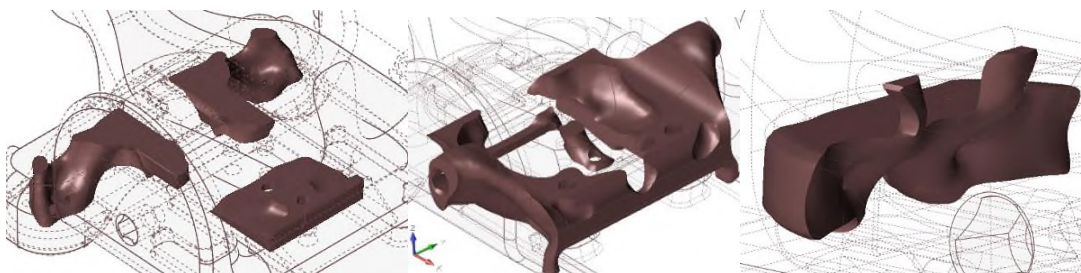
Rys. 116. Jeden z wyników procesu optymalizacji topologicznej wypełnienia elementów

Struktura optymalizowana jest w całej objętości modeli i często jej wynikiem jest bardzo skomplikowany geometrycznie kształt, którego wytworzenie jest limitowane przez możliwości technologii konwencjonalnych, a czasem możliwe do wytworzenia wyłącznie z użyciem technologii przyrostowych (Rys. 117).



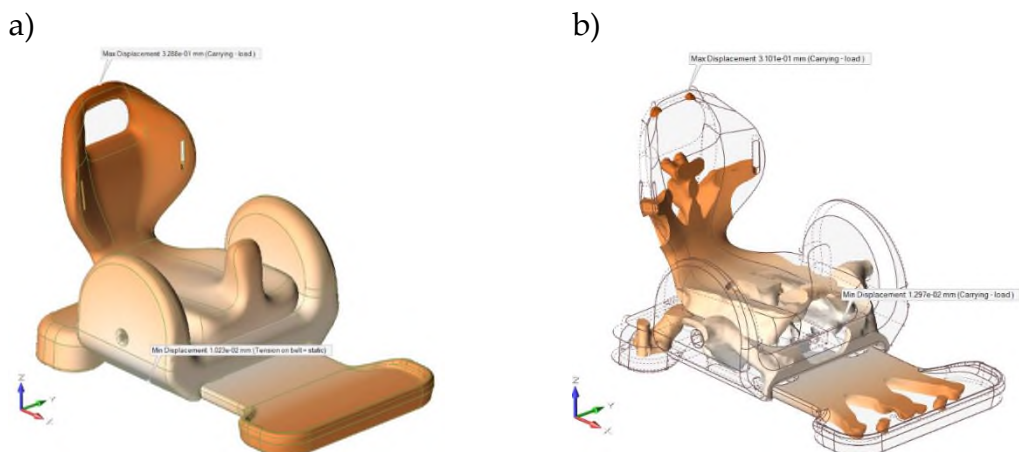
Rys. 117. Widok przekroju zoptymalizowanej struktury wypełnienia modeli (widoczność skorup elementów została wyłączona)

Wyniki optymalizacji topologicznej można przeanalizować wizualnie dla każdego modelu osobno poprzez wyłączanie/włączanie widoczności poszczególnych elementów (Rys. 118).



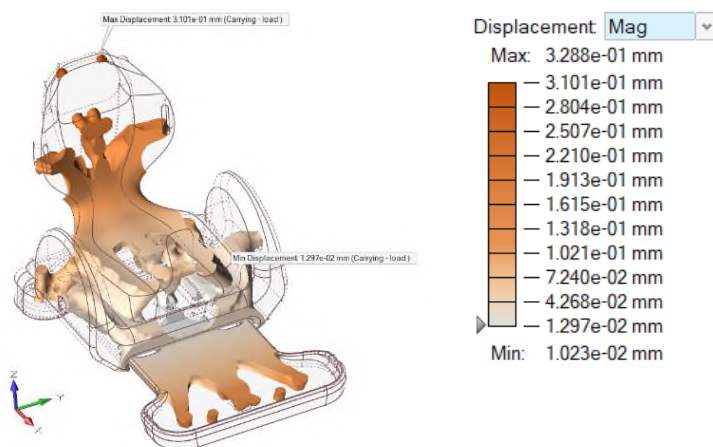
Rys. 118. Analiza wizualna wyników optymalizacji topologicznej dla poszczególnych modeli

Wynik optymalizacji topologicznej należy przeanalizować wytrzymałościowo do zadanych wcześniej obciążeń w celu oceny czy struktura wynikowa spełnia zadane kryteria oraz jest wytrzymała na obrany zestaw obciążeń. W celu umożliwienia przejrzystej analizy wyniku optymalizacji topologicznej wyłączona została widoczność skorupy, dlatego kolejne ilustracje przedstawiać będą wyłącznie model teoretyczny wypełnienia (Rys. 119).



Rys. 119. Wyniki analizy wytrzymałościowej: a) całego złożenia, b) z wyłączoną widocznością skorupy

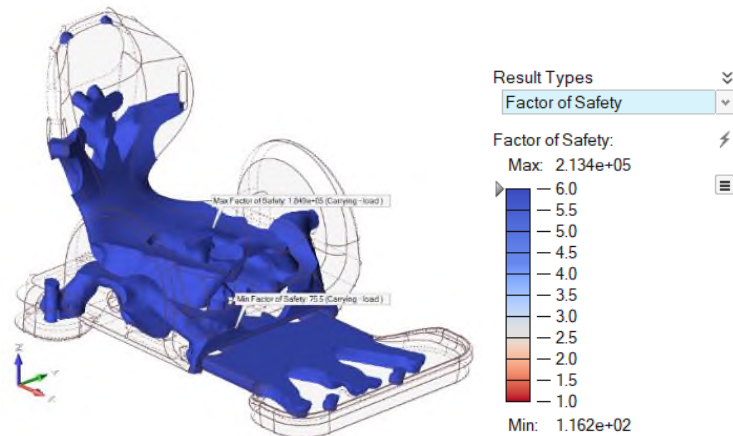
Pierwszym wynikiem analizy wytrzymałościowej są wartości odkształceń (przemieszczeń) spowodowanych zadanymi obciążeniami (Rys. 120). Mapy odkształceń dotyczą odkształceń maksymalnych oraz kierunkowych w osi X, Y, Z. Analizując mapy odkształceń można zauważyć, że obszary najbardziej narażone na przemieszczenia to część podnóżka oraz oparcia. Jednakże same wartości odkształceń są stosunkowo niewielkie, a największe odkształcenie wynosi ok. 0,3 mm.



Rys. 120. Analiza odkształceń maksymalnych

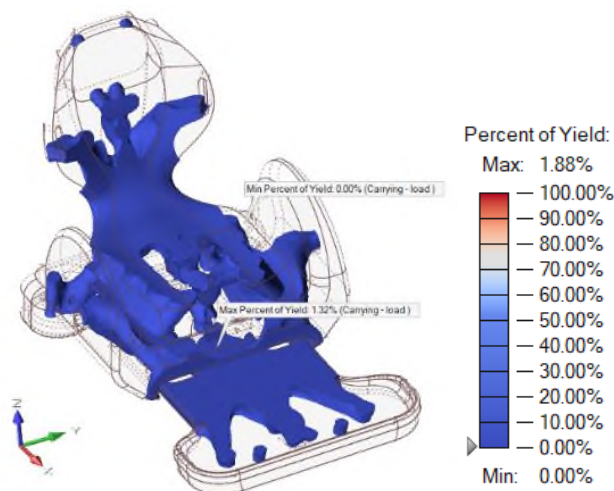
Kolejnym wynikiem analizy wytrzymałościowej wykonanej w środowisku Altair Inspire jest mapa obrazująca rozkład wartości współczynnika bezpieczeństwa dla analizowanego modelu (Rys. 121). Współczynnik bezpieczeństwa pokazuje, które obszary modelu są zagrożone

uplastycznieniem z powodu naprężeń. Współczynnik bezpieczeństwa równy 1,0 lub niższy oznacza, że element może ulec awarii (czy wręcz zniszczeniu). Domyślnie obszary, które zbliżają się do minimalnej wartości współczynnika bezpieczeństwa 1,0 są wyświetlane na czerwono i wskazują, gdzie element jest najbardziej narażony na powstanie awarii czy zniszczenia. Wartość minimalna analizowanej konstrukcji wynosi aż 116 jednostek i występuje na powierzchni siedziska.



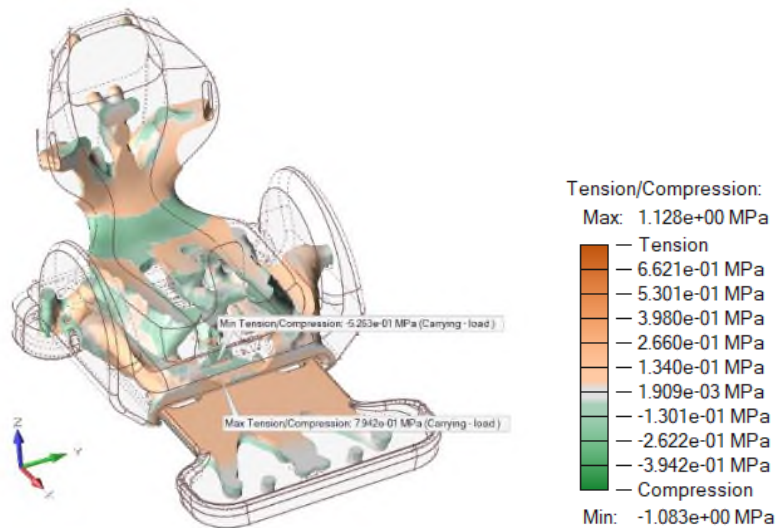
Rys. 121. Współczynnik bezpieczeństwa

Jednym z wyników analizy jest także mapa rozkładu uplastycznienia materiału modelu podanego w procentach [%] (Rys. 122). Procent uplastycznienia definiuje się jako procentowy stosunek uplastycznienia rzeczywistego (doświadczalne) do teoretycznego pomnożony  $\times 100$ . Zasadniczo jest to odwrotność współczynnika bezpieczeństwa wyrażana w procentach. Wartość uplastycznienia wynosząca ok. 100% oznacza, że obszar może ulec awarii. Najwyższa wartość dla analizowanego przypadku wynosi ok. 1,88% i występuje przy krawędzi otworu mocowania siedziska do bazy.



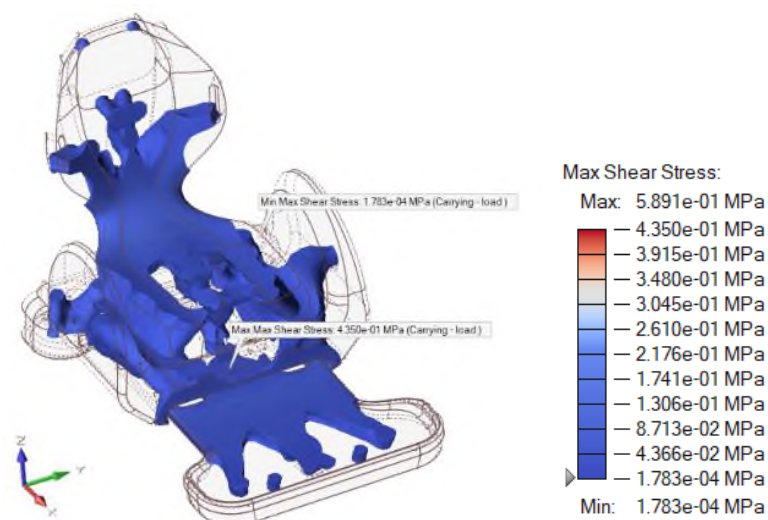
Rys. 122. Uplastycznienie materiału

Kolejnym wynikiem analizy strukturalnej wykonanej w środowisku Altair Inspire jest mapa obszarów ściskanych i rozciąganych pod wpływem zadanego obciążenia (Rys. 123). Ściskanie i rozciąganie należą do kilku najważniejszych rodzajów naprężeń. W zależności od sposobu działania obciążeń, naprężenia dodatnie definiuje się jako rozciąganie, natomiast naprężenia ujemne - ściskanie. Na podstawie wyników można zauważyć, że obszarami najbardziej narażonymi na ściskanie są obszary mocowania siedziska do bazy oraz łącznika. Maksymalna wartość ściskania występuje przy krawędzi otworu mocowania łącznika i wynosi prawie 0,24 MPa, natomiast maksymalne rozciąganie występuje w obszarze mocowania siedziska do bazy i wynosi 0,52 MPa. Podobne naprężenia rozciągające pojawiają się także w obszarze połączenia oparcia z siedziskiem.



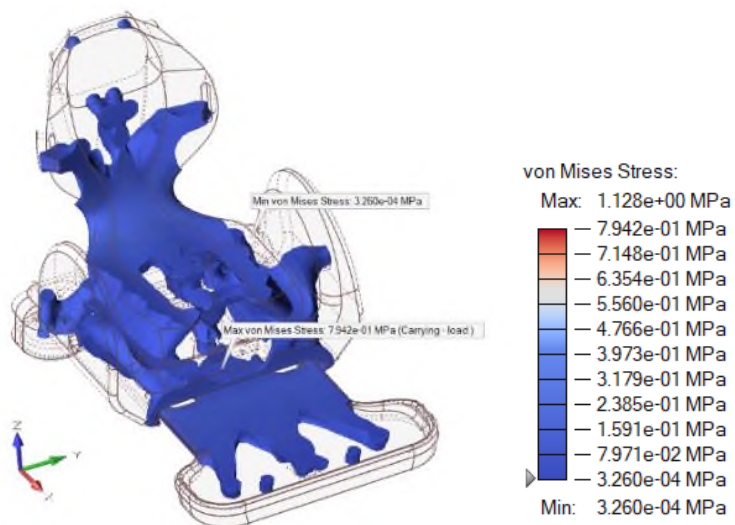
Rys. 123. Ściskanie i rozciąganie

Rys. 124 przedstawia mapę maksymalnych naprężeń ścinających (zwanych także naprężeniami stycznymi lub tnącymi). Maksymalna wartość tych naprężeń pojawia się na krawędzi otworu mocowania siedziska do bazy i wynosi 0,29 MPa.



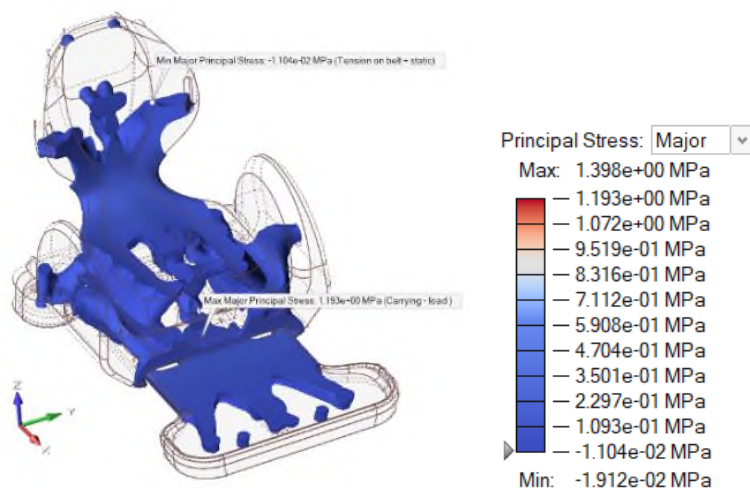
Rys. 124. Naprężenia ścinające

Rys. 125 przedstawia maksymalne naprężenia zredukowane von Misesa. Największe naprężenia występują w obszarze mocowania siedziska, a ich wartość wynosi ok. 0,5 MPa.



Rys. 125. Naprężenia zredukowane von Misesa

Rys. 126 przedstawia mapę rozkładu naprężeń głównych. Naprężeniem głównym nazywa się maksymalne naprężenie normalne (czyli rozciągające lub ściskające) w danym punkcie. Największe naprężenie główne pojawia się w obszarze mocowania siedziska do bazy i wynosi ponad 0,7 MPa.



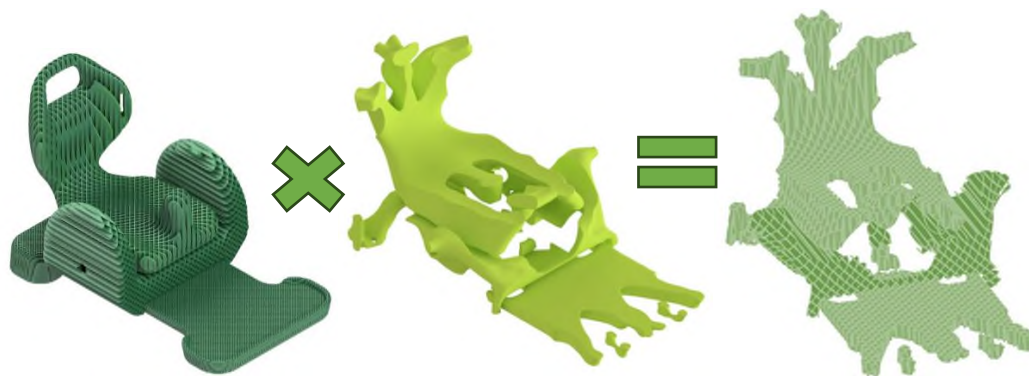
Rys. 126. Rozkład naprężeń głównych

Przedstawione wyżej wyniki analizy wytrzymałościowej świadczą o wysokiej wytrzymałości siedziska na podane obciążenia. Najbardziej narażonym na działanie obciążeń obszarem jest otwór mocowania siedziska do bazy oraz obszar między siedziskiem, a oparciem (na który działają naprężenia rozciągające), a także podnózek.

Wygenerowana struktura z optymalizacji topologicznej przy jej wypełnieniu na 100% powoduje niepotrzebne przesztynwienie całości, czego obrazem jest np. wysoka wartość współczynnika bezpieczeństwa (patrz: rys. 121). Z tego powodu podjęto dalsze badania związane z przeanalizowaniem wytrzymałości dla zoptymalizowanej topologicznie struktury wypełnienia o gęstości zmniejszonej do 20% (będącej odwzorowaniem siatki typu grid generowanej natywnie przez slicer). Ten zabieg miał na celu przeanalizowanie czy konstrukcja ze zoptymalizowaną strukturą wewnętrzną wypełnioną siatką typu grid o gęstości 20% przeniesie zadane obciążenia, a jeśli tak - to czy w wyniku zastosowania wypełnienia zoptymalizowanych topologicznie struktur uda się obniżyć masę końcową wydruków.

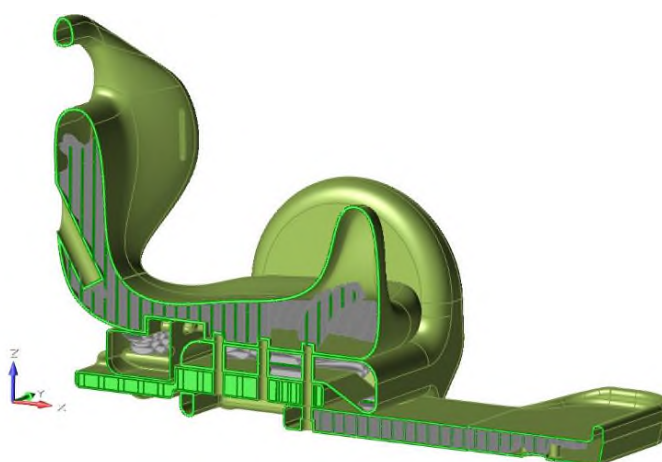
Model bryłowy z wypełnieniem siatkowym struktury zoptymalizowanej topologicznie przedstawiono na rys Rys. 127.





Rys. 127. Model bryłowy wypełnienia modeli ze strukturą zoptymalizowaną siatką typu grid o gęstości 20%

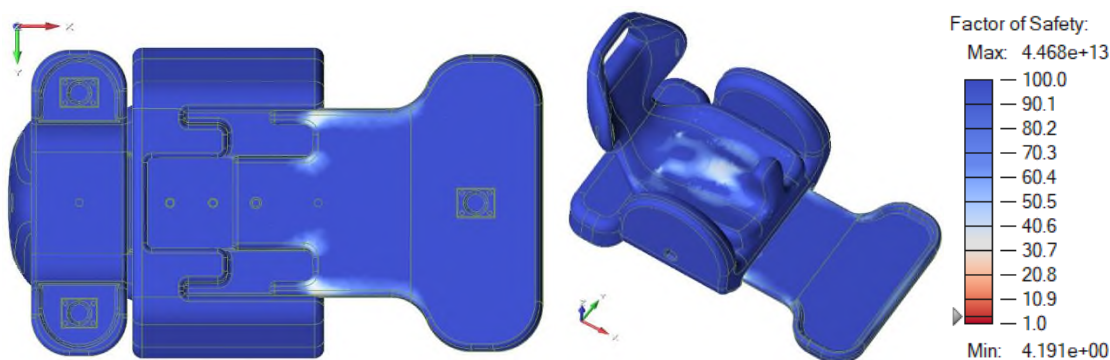
Utworzenie modelu bryłowego wymagało przeprowadzenia szeregu operacji w środowisku Altair Inspire. Do analizy wytrzymałościowej zaimportowane zostały modele: z odwzorowanym wypełnieniem siatkowym; ze strukturą zoptymalizowaną topologicznie oraz skorupy zewnętrzne modeli o zdefiniowanej wcześniej grubości. Osiągnięcie pożądanej postaci geometrycznej wypełnienia wymagało użycia operacji boolowskich (iloczynu) na bryłach modelu siatkowego oraz modelu z optymalizacją topologiczną. Jednak należy podkreślić, że model został w pewnym stopniu uproszczony i nie odwzorowuje w 100% fizycznego wydruku, w którym struktura optymalizacji topologicznej posiada (poza wypełnieniem o gęstości 20%) ściankę o zdefiniowanej grubości. Osiągnięcie takiego efektu ograniczone było skomplikowaną geometrią optymalizacji topologicznej, na której nie można było przeprowadzić operacji *shell* i uzyskać struktury skorupy, ze względu na przecięcia siatki w przewężonych obszarach. Postać geometryczna modeli skorupowych geometrii zewnętrznej nie zmieniła się. Model złożenia został poddany tym samym zestawom obciążeń, co poprzednie modele. Przekrój analizowanego modelu przedstawiono na Rys. 128.



Rys. 128. Przekrój modelu złożenia z siatką typu grid o gęstości 20% wypełniającą strukturę zoptymalizowaną topologicznie

Opracowany model wirtualny odzwierciedla złożenie ze strukturą wnętrza zoptymalizowaną topologicznie wypełnioną siatką o gęstości 20%. Puste przestrzenie wewnątrz skorupy podczas wytwarzania w technologii FDM wypełniane są suportem nieprzenoszącym obciążeń.

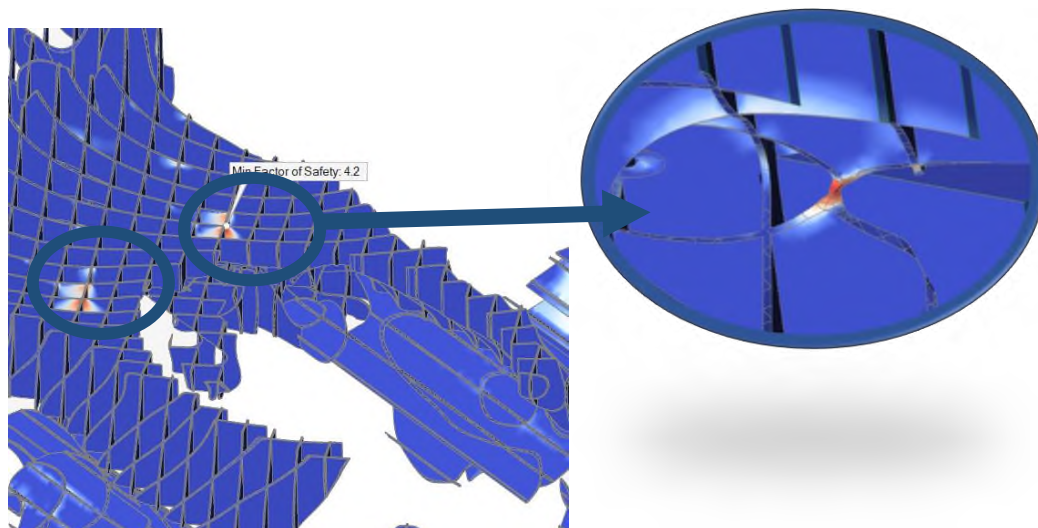
Wybrane wyniki analizy wytrzymałościowej przedstawione zostały na poniższych ilustracjach. Na Rys. 129 przedstawiono mapę współczynnika bezpieczeństwa analizowanego modelu.



Rys. 129. Jasne obszary modelu złożenia o najniższym współczynniku bezpieczeństwa

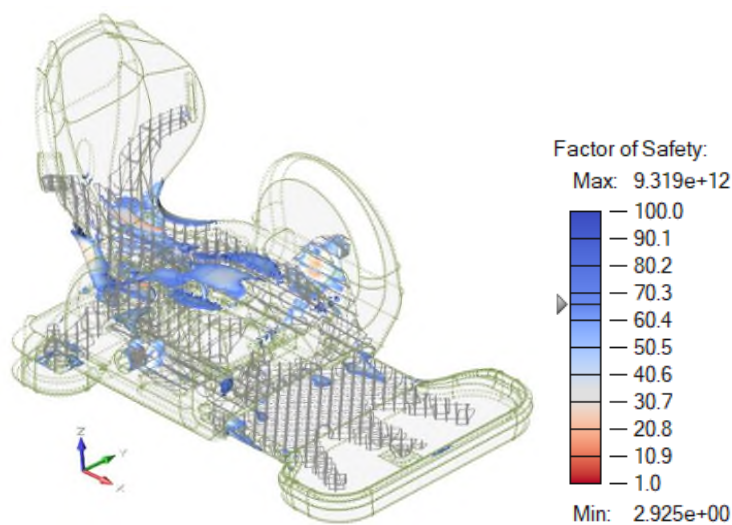
Najniższa wartość współczynnika bezpieczeństwa wynosi niecałe 4,2 jednostki, co w kontekście przeanalizowanych wcześniej rozwiązań stanowi niską wartość (porównywalną z wynikiem uzyskanym dla modelu skorupowego), ale spełnia założone kryteria (minimalny współczynnik bezpieczeństwa  $6 = 3$ ). Skala legendy ustawiona w zakresie 1-100 umożliwia dostrzeżenie słabszych obszarów (jasny kolor) wózka. Obszary te zaznaczone w odcieniach szarości występują m.in. na obszarze powierzchni siedziska oraz w miejscach kontaktu mocowania podnóżka do bazy.

Jednak po dogłębnej analizie wyniku, zauważono, że jest on związany z błędami siatki utworzonej na strukturze zoptymalizowanej topologicznie (Rys. 130). Występujące w siatce przewężenia spowodowały lokalne spiętrzenie naprężeń i znacząco obniżyły wartość współczynnika bezpieczeństwa.



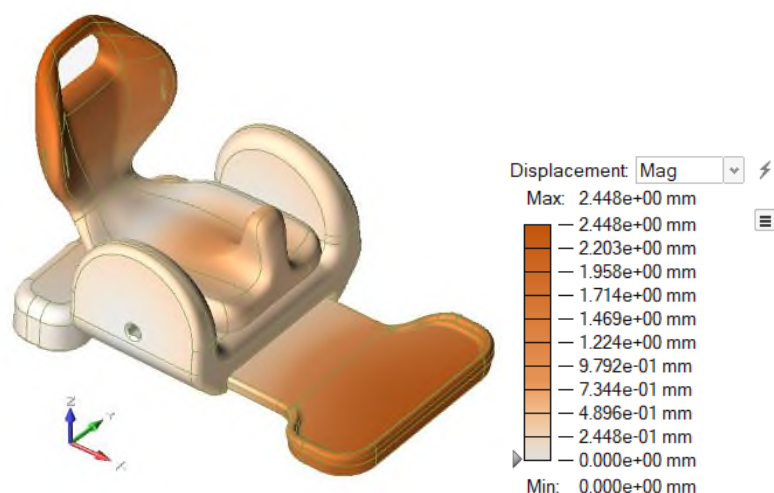
Rys. 130. Lokalne spiętrzenia naprężeń w skomplikowanych obszarach siatki wypełniającej strukturę zoptymalizowaną

Ponadto, przy analizie poszczególnych wartości współczynnika bezpieczeństwa zauważono, że dla najsłabszych obszarów sięga on wartości ponad 60 jednostek, co jest bardzo dużą wartością (Rys. 131).



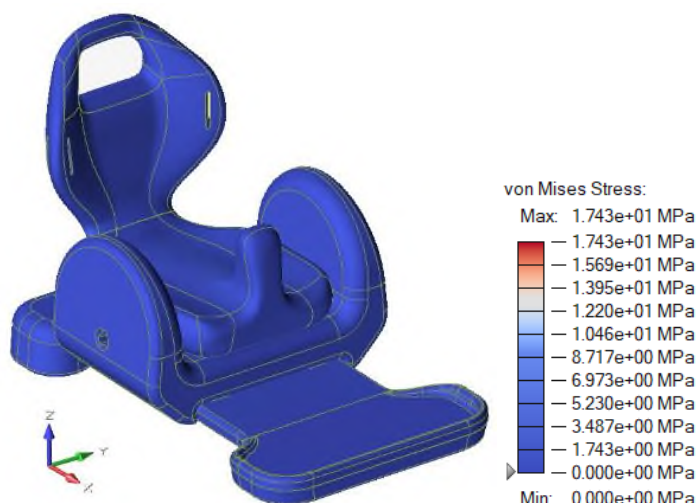
Rys. 131. Najsłabsze obszary złożenia

Maksymalna wartość odkształcenia, które może wystąpić w modelu sięga wartości ponad 2,4 mm i występuje w obszarze oparcia oraz podnóżka (Rys. 132), co nie powinno niepokoić, gdyż dotyczy najbardziej wysuniętego elementu wózka.



Rys. 132. Maksymalne odkształcenie

Maksymalne naprężenia zredukowane występują również w przewężonych obszarach siatki wypełnienia i ich wartość sięga 17,4 MPa (Rys. 133).


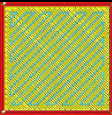
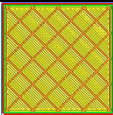




Rys. 133. Naprężenia zredukowane von Misesa

W Tab. 12 przedstawiono wyniki analizy wytrzymałościowej wybranych przypadków (w kontekście ich wypełnienia):

- 1) model pełny (wypełnienie 100%),
- 2) model skorupowy,
- 3) model z wypełnieniem regularnym grid o gęstości 20%,
- 4) model powstały w wyniku optymalizacji topologicznej - wypełnienie o gęstości 100%,
- 5) model powstały w wyniku optymalizacji topologicznej - wypełnienie o gęstości 20% siatką typu grid (patrz: rys. 127).

Tab. 12. Wyniki analizy wytrzymałościowej dla poszczególnych przypadków modelu wózka z różnym wypełnieniem

Konfiguracja		1	2	3	4	5
Ilustracja						
<b>Odształcenia max.</b>	mm	0,14	5,52	0,72	0,29	2,45
<b>Odształcenia X</b>	mm	0,06	5,29	0,64	0,22	2,28
<b>Odształcenie Y</b>	mm	0,002	0,55	0,03	0,02	0,13
<b>Odształcenie Z</b>	mm	0,15	2,28	0,17	0,26	1,4
<b>Max von Mises</b>	MPa	0,79	12,85	3,41	0,76	17,4
<b>Max Shear</b>	MPa	0,46	7,39	1,82	0,43	9,47
<b>Wsp. bezpieczeństwa</b>	-	75,9	3,9	15	66,8	4,2
<b>Główne naprężenia</b>	MPa	0,6	7,05	4,55	0,86	18,19


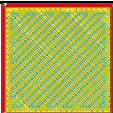
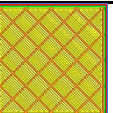


Gdzie: 1 – model pełny, 2 - model skorupowy, 3 – model z wypełnieniem 20% typu grid, 4 - model z optymalizacją topologiczną o gęstości 100%, 5 - model z optymalizacją topologiczną o gęstości 20% (wypełnienie siatką typu grid)

Wytrzymałość mechaniczna wszystkich modeli była testowana dla jednakowych zestawów obciążeń w środowisku Altair Inspire. Konfiguracja nr 1 (model pełny) i 2 (model skorupowy) zostały przeanalizowane w celu porównawczym i również zestawione w tabeli. Wyniki dla tych przypadków przedstawiają graniczne wartości wyników oraz stanowią odniesienie dla pozostałych analizowanych przypadków. Model z optymalizacją topologiczną wypełnioną w 100% (nr 4) charakteryzuje się wyjątkowo dobrymi wynikami, które są najbardziej zbliżone do modelu pełnego (nr 1). Odształcenie maksymalne występujące w modelu nr 4 wynosi zaledwie 0,29 mm, podczas gdy maksymalne odkształcenie modelu z optymalizacją topologiczną, wypełnioną w 20% (nr 5) sięga wartości 2,45 mm. Maksymalna wartość naprężeń zredukowanych (von Misesa) dla modelu z optymalizacją topologiczną wypełnioną w 100% (nr 4) wynosi zaledwie 0,76 MPa, co stanowi ponad 3-krotnie niższą wartość niż w przypadku modelu z siatką regularną (nr 3)

i wskazuje na większą sprężystość modelu. Naprężenia zredukowane dla przypadku nr 5 wynoszą 17,4 MPa i przewyższają wartość wynik osiągnięty dla modelu skorupowego (nr 2) – 12,85 MPa, co może świadczyć o błędzie związanym z lokalnym spiętrzeniem naprężeń, bądź błędzie obliczeniowym. Nawet pomimo stosunkowo wysokiej wartości naprężeń zredukowanych w modelach nr 2 i nr 5 wartości te są znacznie niższe w odniesieniu do granicy plastyczności filamentu PLA deklarowanej przez producentów (patrz: Tab. 5), która wynosi ok. 51 MPa, co wskazuje na to, że wydruki modeli nr 2 i nr 5 wytrzymają zadane obciążenia statyczne. Analizując wartości współczynnika bezpieczeństwa dla poszczególnych modeli można zauważyć, że najwyższy wynik osiągnęły przypadki nr 4 – model z optymalizacją topologiczną wypełnioną w 100% (66,8 jednostek) oraz nr 1 – model pełny (74,9 jednostek). Tak wysoka wartość współczynnika bezpieczeństwa wskazuje na przesztynienie konstrukcji. Najniższy wynik współczynnika bezpieczeństwa posiada konstrukcja nr 2 – model skorupowy (3,9 jednostek) i nr 5 – model z optymalizacją topologiczną wypełnioną w 20% (4,2). Współczynnik bezpieczeństwa modelu nr 3 – z regularnym wypełnieniem siatkowym, wynosi 15 jednostek. Biorąc pod uwagę założenia i przyjęty do obliczeń (patrz podrozdział: 4.2) współczynnik bezpieczeństwa na poziomie 3 jednostek, wszystkie wyniki spełniły założenia projektowe.

Ze względów technologicznych wydrukowanie modeli z wypełnieniem zoptymalizowanym topologicznie zawiera w środku suport (strukturę podporową), który zapobiega zapadnięciu się warstw podczas wydruku. Na suport zużywany jest filament, który pozostając wewnątrz – nie przenosi obciążeń, natomiast na zewnątrz – po zakończeniu procesu druku jest oddzielany od modelu właściwego. Z tego powodu, że masa końcowa zaprojektowanego urządzenia jest jednym z kryteriów doboru optymalnego rozwiązania, utworzone zostało porównanie masy końcowej różnych przypadków wydruku. W Tab. 13 porównane zostały masa brutto (rozumiana jako ilość filamentu potrzebna na wydruk „surowego” modelu ze suportem – tym „zamkniętym” wewnątrz skorupy oraz tym na zewnątrz, który zostaje usunięty) i masa netto (rozumiana jako masa wydruku bez suportu zewnętrznego, który zostaje usunięty z modelu w procesie tzw. *post-processingu*) w różnych konfiguracjach wypełnienia. Ponadto zsumowano także czas druku potrzebny do wytworzenia każdego zestawu wydruków dla danej konfiguracji (czas jest zsumowany dla wydruku każdego z 5 elementów złożenia). Wartości przedstawione w tej tabeli wynikają z symulacji procesu druku każdego z rozpatrywanych przypadków w oprogramowaniu Ultimaker Cura.

Tab. 13. Porównanie masy i czasu druku poszczególnych konfiguracji

Konfiguracja		1	2	3	4	5
Ilustracja						
<b>Masa brutto</b>	g	13 960	4 437	4 343	7 629	4 994
<b>Masa netto</b>	g	13 868	4 345	4 251	7 537	4 902
<b>Czas druku</b>	h	710	230	184	380	265

Gdzie: 1 – model pełny, 2 - model skorupowy, 3 – model z wypełnieniem 20% typu siatka, 4 - model z optymalizacją topologiczną o gęstości 100%, 5 - model z optymalizacją topologiczną o gęstości 20% (wypełnienie siatką typu grid)

Analizując różnicę między masą netto i brutto wszystkich konfiguracji można dostrzec, że masa usuwanego materiału suportów zewnętrznych z modeli wynosi ok. 92 g, co stanowi bardzo niewielki odsetek odpadu w stosunku do całkowitej masy modeli i świadczy o ekonomiczności konstrukcji. W modelach z pustymi przestrzeniami wewnątrz skorupy (czyli nr 2 – model skorupowy, oraz nr 4 i 5 – modele z optymalizacją topologiczną) generowane są suporty, których nie można usunąć z wnętrza modeli, co wpływa na zwiększenie masy netto poszczególnych wydruków. Najniższą masę końcową (4 251 g) według symulacji druku posiada model wytworzony zgodnie z konfiguracją nr 3 – czyli model regularnym wypełnieniem siatkowym o gęstości 20%. Osiągnięta wartość masy netto konfiguracji nr 2, 3 i 5 spełnia założenia projektowe (patrz podrozdział: 3.1) dotyczące maksymalnej masy projektowanego pojazdu i nie przekracza 5 kg (bez uwzględnienia kół i elementów złącznych całego pojazdu). Szacunkowy czas wydruku wszystkich elementów złożenia (podobnie jak ilość zużytego filamentu) świadczy o ekonomiczności danej konfiguracji związanej ze zużyciem prądu w czasie pracy urządzenia FDM. Według symulacji druku w slicerze Ultimaker Cura najkrótszym czasem wytwarzania (ok. 184 h) charakteryzują się modele, które wypełnione są regularnym wzorem siatki o gęstości 20%.

### 4.3. Dyskusja i wybór rozwiązania optymalnego

Proces decyzyjny związany z wyborem rozwiązania optymalnego jest procesem złożonym, na który wpływa wiele czynników i kryteriów. Wśród przeanalizowanych konfiguracji wydruków pojawiają się rozwiązania dopuszczalne, spełniające kryterium wytrzymałości konstrukcji oraz/lub kryterium minimalnej masy modeli, spośród których należy wybrać jedno rozwiązanie optymalne. Wybór optymalnego rozwiązania zależy od przyjętych kryteriów i ich wag (autorka przyjęła kryteria oraz ich wagi subiektywnie, na podstawie własnego doświadczenia). W tym celu wybrano 3 główne kryteria: wytrzymałość konstrukcji, masa końcowa (netto) wydruków oraz czas druku. Każdemu kryterium oceny przypisano wagi ( $w_i$ ). Im wyższa przyznana waga, tym istotniejsze jest kryterium. Najważniejszym kryterium jest wytrzymałość konstrukcji, ponieważ wpływa na bezpieczeństwo użytkowania pojazdu. Masa końcowa jest również istotna w kontekście funkcjonalności, ergonomii oraz łatwości użytkowania pojazdu przez dziecko. Ponadto częściowo masa końcowa ma także wpływ na cenę produktu (zużycie filamentu) oraz jego opłacalność technologiczną. Natomiast dla kryterium czasu druku przyznano najniższą wagę, ponieważ jego wartość wpływa przede wszystkim na ekonomiczność wytwarzania produktu (zużycie prądu, zużycie sprzętu). Ocenę ( $k_i$ ) poszczególnych konfiguracji w danym kryterium determinował wynik przeprowadzonych wcześniej badań (patrz: Tab. 12 i Tab. 13). Każda z konfiguracji otrzymała od 1 do 5 punktów, przy czym wartość „1” oznacza wynik najgorszy w danym kryterium, natomiast wartość „5” – najlepszy.

Ostateczna ocena końcowa ( $Z$ ) każdej z analizowanych konfiguracji jest sumą ważoną poszczególnych kryteriów. Wynik ten został obliczony na podstawie metody ważonych kryteriów (ang. *weighted objectives method*). Wartość oceny obliczono następująco:

$$Z = \sum_{i=0}^3 w_i \cdot k_i$$

Gdzie:

$w_i$  – waga i-tego kryterium

$k_i$  – ocena i-tego kryterium

przy czym:

$$0 \leq w_i \leq 1$$

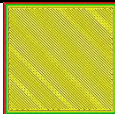
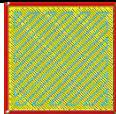
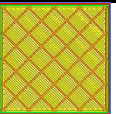


oraz



$$\sum_{i=0}^3 w_i = 1$$

Wartość ważona oceny jest oceną punktową, ponieważ wagi poszczególnych kryteriów ustalone są na podstawie skali punktowej w zakresie od 0 do 1. Całość przedstawiona została w tabeli optymalizacji wielokryterialnej (Tab. 14).

Tab. 14. Tabela optymalizacji wielokryterialnej

Konfiguracja	1	2	3	4	5	
Ilustracja						
<i>i</i> - kryterium	Waga ( $w_i$ )		Ocena kryterium ( $k_i$ )			
<b>1 - Wytrzymałość</b>	0,6	5	1	3	4	2
<b>2 - Masa końcowa</b>	0,3	1	4	5	2	3
<b>3 - Czas druku</b>	0,1	1	4	5	2	3
<b>OCENA KOŃCOWA (Z)</b>		3,4	2,2	<b>3,8</b>	3,2	2,4

Gdzie: Konfiguracja 1 – model pełny, 2 - model skorupowy, 3 – model z wypełnieniem 20% typu grid, 4 - model z optymalizacją topologiczną o gęstości 100%, 5 - model z optymalizacją topologiczną o gęstości 20% (wypełnienie siatką typu grid)

Maksymalna możliwa wartość oceny końcowej, dla potencjalnego rozwiązania, które spełniałoby każde kryterium w najwyższym stopniu wynosiłaby „5”. Z pięciu analizowanych konfiguracji rozwiązaniem o najwyższym uzyskanym wyniku końcowym jest konfiguracja nr 3 czyli model z regularną siatką wypełnienia o gęstości 20%. To rozwiązanie uzyskało wynik o wartości 3,8 i uznane zostało za optymalne. Rozwiązanie to posiada wystarczającą wytrzymałość mechaniczną, stosunkowo niską masę, a ponadto charakteryzuje się najkrótszym czasem wytwarzania z analizowanych konfiguracji.

Przeprowadzona analiza dotyczyła 5 różnych konfiguracji wydruków: modelu pełnego, modelu skorupowego, modelu z regularną siatką o gęstości

20% w całej objętości oraz 2 przypadków z wypełnieniem zoptymalizowanym topologicznie (wypełnionym w 100% oraz w 20%). Spośród analizowanych konfiguracji optymalnym rozwiązaniem jest model z regularną siatką wypełnienia o gęstości 20%, jednak należy podkreślić w tym miejscu potencjał modeli ze zoptymalizowanym topologicznie wypełnieniem. Optymalizacja topologiczna wypełnienia elementów - wytwarzanych za pomocą technologii przyrostowej FDM - umożliwiła uzyskanie struktury wytrzymałej na zdefiniowane przypadki obciążeń (konfiguracja nr 4 i 5). Dodatkowe obniżenie jej gęstości do 20% (konfiguracja nr 5) pozwoliło na obniżenie masy końcowej wózka według założeń projektowych poniżej 5 kg. Należy także wspomnieć, że analizowane wytrzymałościowo modele ze strukturą zoptymalizowaną topologicznie dotyczyły najbardziej newralgicznych modeli, czyli takich, które w pustej przestrzeni wnek nie posiadają struktury przenoszącej obciążenia (a podczas wytwarzania wypełniane są wyłącznie suportem).

Propozycją autorki do kontynuacji dalszych badań jest opracowanie modeli, które posiadają strukturę złożoną: zoptymalizowaną topologicznie strukturę wypełnioną w 20% (tak jak konfiguracja nr 5) oraz dodatkowo – zamiast suportów wypełniających puste wnęki - regularne wypełnienie o gęstości 5% w pustych przestrzeniach skorupy. Modele wirtualne odwzorowujące tego rodzaju złożoną konstrukcję (i stanowiące pewnego rodzaju kompromis technologiczny) mogą zostać poddane dalszej analizie wytrzymałościowej w dalszych badaniach.

# Rozdział 5.

## Podsumowanie

W rozdziale piątym znajduje się podsumowanie prowadzonych badań oraz wnioski z nich płynące. W rozdziale tym przedstawiony został też kierunek dalszych prac.

### 5.1. Podsumowanie

Skonstruowanie urządzenia rehabilitacyjnego przeznaczonego dla dzieci ze niepełnosprawnościami ruchowymi, nadanie mu estetycznej i ergonomicznej zewnętrznej postaci geometrycznej, a następnie optymalizacja wypełnienia jego struktury wewnętrznej z zastosowaniem optymalizacji topologicznej stanowiło duże wyzwanie inżynierskie i naukowe.

Główny cel projektowy pracy dotyczył zaprojektowania pojazdu dla najmłodszych pacjentów z dysfunkcją kończyn dolnych, które umożliwiłoby im samodzielność w przemieszczaniu się. Aspektem psychologicznym tego celu była poprawa jakości życia najmłodszych pacjentów poprzez umożliwienie im samodzielności w przemieszczaniu się przy np. zabawie z rówieśnikami. Ponadto cały proces projektowy skupiony był na użytkowniku docelowym (tzw. *Human Centered Design*), na jego potrzebach i zachowaniu. Dzięki temu powstał wózek, który poza swoją ergonomiczną funkcjonalnością jest użyteczny i przyjazny dla użytkownika. Warto wspomnieć, że zaproponowany wózek nie tylko jest konkurencyjny cenowo, ale przede wszystkim wypełnia niszę na rynku krajowym i zagranicznym (patrz: podrozdział 2.1.3). Dodatkowo, dzięki przewidzianemu procesowi wytwarzania, projekt stał się ogólnodostępny na całym świecie. Wózek został zaprojektowany w taki sposób, aby każda osoba posiadająca dostęp do drukarki 3D (klasy FDM) mogła go wyprodukować samodzielnie (dokupując tylko elementy powszechne typu koła czy elementy łączące - śruby).

Efektom realizacji celu projektowego badań było uzyskanie pożądanych cech funkcjonalnych autorskiego pojazdu, m.in.:

- łatwość obsługi i zapewnienie samodzielności poruszania się dzieciom z niepełnosprawnością ruchową,
- oryginalna postać geometryczna „przyjazna” dzieciom,
- funkcjonalność – możliwość dostosowania wózka do zmieniających się rozmiarów użytkownika,
- stosunkowo niska cena końcowa wytworzenia produktu (niecałe 800 PLN),

- dostępność produktu poprzez łatwość wytwarzania za pomocą technologii FDM.

Zaproponowany pojazd, nie tylko został zaprojektowany, ale także poddany walidacji i weryfikacji. Według przeprowadzonej analizy numerycznej wpływ zadanych obciążeń na konstrukcję pojazdu nie przekracza naprężeń dopuszczalnych dla przyjętego tworzywa filamentu, a wymagany współczynnik bezpieczeństwa jest zachowany. Weryfikacja wytworzonego wózka odbyła się najpierw na dzieciach zdrowych (łącznie z dziećmi przekraczającymi zakres wagowy i wiekowy oraz podczas bardzo dynamicznej zabawy na wózku), a także na dzieciach z niepełnosprawnościami. Dzięki testom przeprowadzonym w Specjalnym Ośrodku Szkolno – Wychowawczym dla Dzieci i Młodzieży Niepełnosprawnej z Dąbrowy Górniczej możliwe było przetestowanie produktu w jego docelowym środowisku. Widok dzieci, które nie potrafiły chodzić, a dzięki wózkowi stały się mobilne na sali zajęć i przemieszczały się samodzielnie na wysokości rówieśników (a nie na dużym wózku rehabilitacyjnym) daje pełną satysfakcję z wykonanej rozprawy doktorskiej. Aspekt psychologiczny przeprowadzonych badań – czyli przywrócenie godności dzieciom z niepełnosprawnością ruchową, które wcześniej musiały czołgać się po podłodze lub polegać na pomocy opiekunów jest największym atutem wykonania tej pracy. Warto również zaznaczyć bardzo pozytywny odbiór produktu przez terapeutów pracujących z dziećmi.

Głównym celem naukowym badań było badanie optymalizacji struktury wewnętrznej pojazdu przy zachowaniu postaci geometrycznej skorupy zewnętrznej. Dodatkowo, w wyniku przeprowadzonych działań wykonano analizę wytrzymałościową różnych konfiguracji modeli przeznaczonych do wytwarzania w technologii FDM z uwzględnieniem projektowania optymalnego, czyli świadomego i sformalizowanego wykorzystania procedur optymalizacyjnych w procesie projektowania.

Zasadność przeprowadzonej optymalizacji topologicznej wyłącznie struktury wypełnienia części zaprojektowanego urządzenia miała swoje uzasadnienie m.in. w kontekście bezpieczeństwa użytkowników, dla których zwarta i opływowa postać geometryczna pojazdu nie stwarzała ryzyka utknięcia części ciała w otworach konstrukcji, które mogłyby pojawić się w przypadku zastosowania optymalizacji topologicznej całych modeli. Podejście to jest zgodne z wymaganymi normami dotyczącymi bezpieczeństwa użytkowania urządzeń rehabilitacyjnych. Dodatkowo zastosowanie optymalizacji topologicznej wypełnienia modeli i pozostawienia ich zwartej postaci geometrycznej skorupy

zapewniło łatwość utrzymywania higieny użytkownika urządzenia – jego dezynfekcji i czyszczenia powierzchni bez zagłębień, otworów itp.

Optymalizacja topologiczna wypełnienia wydruków stwarza pewnego rodzaju nową możliwość w wytwarzaniu funkcjonalnych wydruków za pomocą technologii FDM, które są przeanalizowane na działanie różnych zestawów obciążeń i tworzą pewnego rodzaju „inteligentne wypełnienie” w przeciwieństwie do stosowania automatycznych wypełnień, których wybór uzasadniony jest jedynie „wycuciem” i intuicją konstruktora.

Z drugiej strony zastosowanie optymalizacji topologicznej wypełnienia wydruków w technologii FDM posiada swoje ograniczenia, szczególnie w przypadku wypełniania pustych przestrzeni wnętrza modeli strukturą podporową (suportem), która nie przenosi żadnych obciążeń, a zwiększa masę wydruku. Warto wspomnieć, że już na etapie projektowania skorupy zewnętrznej wózka, problem ten został wzięty pod uwagę i wózek został zaprojektowany w taki sposób aby zminimalizować liczbę podpór zewnętrznych. Natomiast wyeliminowanie suportów wewnątrz skorupy modeli z optymalizacją topologiczną wypełnienia jest możliwe i stanowi propozycję do kontynuowania dalszych badań.

Analiza zoptymalizowanych topologicznie elementów wózka umożliwiła przetestowanie jego modelu wirtualnego m.in. pod względem wytrzymałości konstrukcji zmniejszając ryzyko możliwych problemów związanych z jego eksploatacją. Wypełnienie w 100% zoptymalizowanej topologicznie struktury wewnętrznej pojazdu spełnia zbiór kryteriów, jednak posiada masę wyższą od zakładanej, co wpłynęło na podjęcie próby zmniejszenia gęstości wypełnienia uzyskanej struktury zoptymalizowanej na 20%. Konfiguracja ta również została przeanalizowana pod względem wytrzymałościowym

Przeanalizowane wartości masy końcowej elementów wytworzonych w różnych konfiguracjach (zaproponowanych subiektywnie przez autorkę) wykazały najniższą wartość dla modelu z regularnym wzorem siatki o gęstości 20% w całej objętości wypełnienia, którego masa wynosi 4 251 g. Ponadto, czas wytwarzania poszczególnych elementów z regularną siatką o gęstości 20% był najkrótszy w porównaniu do pozostałych analizowanych konfiguracji.

Słuszność postawionych tez rozprawy wykazano przez opracowanie autorskiego pojazdu rehabilitacyjnego oraz przeprowadzenie procesu optymalizacji jego konstrukcji w celu minimalizacji masy przy zachowaniu pożądanej wytrzymałości mechanicznej. Za pomocą najpowszechniejszej oraz stosunkowo najtańszej technologii wytwarzania generatywnego – FDM,

wytworzony został w pełni funkcjonalny pojazd rehabilitacyjny. Wybór tej technologii miał wpływ na cenę końcową produktu (ok. 800 PLN) oraz popularyzację możliwości wytwarzania tego typu pojazdów. Optymalizacja topologiczna wypełnienia elementów użytkowych autorskiego urządzenia umożliwiła uzyskanie struktury wypełnienia wytrzymałej na zdefiniowane przypadki obciążeń oraz pozwoliła na minimalizację masy końcowej urządzenia, co spełniło założenia projektowe. Według przeprowadzonej analizy wielokryterialnej pięciu różnych konfiguracji rozwiązaniem optymalnym jest model z regularnym siatkowym wypełnieniem o gęstości 20%.

Na koniec należy także dodać, że w celu ochrony wyników niniejszej rozprawy złożono zgłoszenie patentowe. Z ramienia Politechniki Śląskiej wysłany został wniosek o udzielenie patentu na wynalazek pt. „Pojazd manualny dla dzieci z niepełnosprawnością ruchową”, które Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej przyjął dnia 20.11.2023. Zgłoszenie oznaczone numerem P.446782 [WIPO ST 10/C PL446782].

## 5.2. Wnioski i obserwacje

Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań wysnuto następujące wnioski:

- możliwe jest wytworzenie w pełni funkcjonalnego pojazdu rehabilitacyjnego w technologii FDM, który jest adaptacyjny dla zmieniających się rozmiarów dzieci w wybranym zakresie wieku,
- projektowanie zorientowane na najmłodszego użytkownika przyniosło oczekiwane rezultaty w aspekcie wizualnym oraz psychologicznym - zaprojektowane urządzenie rehabilitacyjne przypomina dzieciom zabawkę i minimalizuje stygmatyzację społeczną użytkownika,
- zastosowanie optymalizacji topologicznej wypełnienia wydruków dla określonego zestawu obciążeń może skutecznie zminimalizować masę wytworu przy zachowaniu jej wytrzymałości, jednak wiąże się z wydłużeniem czasu procesu projektowego o czynności związane z optymalizacją topologiczną oraz przygotowaniem modeli do druku,
- wypełnienie wydruków zoptymalizowane topologicznie stanowi pewnego rodzaju „inteligentne wypełnienie”, które zagęszczone jest w obszarach przenoszących obciążenia, natomiast w pozostałej przestrzeni może zostać wypełnione suportem, bądź – według propozycji do dalszych badań - regularnym wzorem generowanym przez oprogramowanie urządzenia drukującego – co wiąże się z przeprowadzeniem kolejnych operacji,

- ograniczenia technologiczne związane z drukiem FDM i koniecznością generowania podpór w pustych przestrzeniach wewnątrz skorupy elementów wpływają na masę końcowych modeli z optymalizacją topologiczną struktury wewnętrznej.

### 5.3. Osiągnięcia oryginalne

Najważniejszymi, oryginalnymi (zdaniem autorki) elementami przeprowadzonych badań są:

- opracowanie nowej, oryginalnej postaci konstrukcyjnej pojazdu rehabilitacyjnego przeznaczonego dla najmłodszych dzieci;
- wytworzenie w pełni funkcjonalnego urządzenia za pomocą popularnej technologii druku 3D – FDM;
- opracowanie zoptymalizowanej topologicznie struktury wypełnienia modeli wytwarzanych w technologii FDM;
- analiza wytrzymałościowa i porównanie wykonanych modeli wirtualnych z różną strukturą wypełnienia.

### 5.4. Kierunki dalszych prac

Po analizie wyników badań, ich weryfikacji oraz walidacji, zaproponowano kilka kierunków dalszych badań naukowych i prac rozwojowych, które można podjąć w przyszłości.

1. Analiza modeli wielostrukturalnych, czyli takich, które zawierają strukturę zoptymalizowaną topologicznie o danej gęstości (np. 20%) oraz regularne wypełnienie pustych wnęk skorupy wzorem o niskiej gęstości (np. 5%) zamiast suportami, a także próba wytworzenia modeli wielostrukturalnych w technologii FDM.
2. Przeprowadzenie analizy doświadczalnej wytrzymałości materiału. Analiza wytrzymałościowa MES tak jak inne metody numeryczne obciążona jest ograniczeniami związanymi z różnorodnością i złożonością postaci geometrycznych analizowanych obiektów oraz charakteru obciążeń, jak i trudnościami w modelowaniu właściwości materiałowych, a tym bardziej jeżeli analizowane materiały są anizotropowe. Możliwość teoretycznej analizy wytrzymałościowej złożenia zaprojektowanego wózka wydaje się niewystarczająca, co w konsekwencji wyznacza kierunek dalszych badań nad projektem poprzez analizę doświadczalną pojazdu. Przeprowadzenie badań doświadczalnych dotyczących wytrzymałości oraz trwałości pojazdu wytworzonego w technologii FDM z filamentu PLA, ale również innych

tworzyw sztucznych (np. PET-G, ABS) pozwoliłoby ponownie zweryfikować wyniki analizy teoretycznej.

3. Przeprowadzenie testów fizycznych modeli z optymalizacją topologiczną struktury wypełnienia. Fizyczne przetestowanie wymaga wydruków modeli z różnymi wariantami wypełnienia wewnętrznego i porównania wyników doświadczalnych. Warto byłoby ukierunkować dalsze badania na wydruk serii modeli z różnym rodzajem wypełnienia i przetestowania doświadczalnego ich wytrzymałości przy różnych rodzajach obciążeń.
4. Rozwój konstrukcji pojazdu. Jednym z kierunków projektowych dalszych działań jest też rozwój samej konstrukcji pojazdu (np. wymiana kółek) czy jej elementów dodatkowych (np. stolik, uchwyt na butelkę, itp.) lub wytworzenie kilku wariantów konstrukcji pojazdu.
5. Opracowanie formy konwersji plików z oprogramowania urządzeń drukujących do modeli trójwymiarowych. W trakcie przeprowadzonych badań zauważono także brak możliwości wyeksportowania danych z oprogramowania drukarki do jakiegokolwiek innego formatu, który mógłby zostać przetworzony i wczytany jako trójwymiarowy model odwzorowujący model wydruku o zadanych parametrach, na którym potencjalnie może zostać przeprowadzona analiza wytrzymałościowa. Ten obszar może stanowić podstawę do działań związanych z opracowaniem programu służącego do konwersji tego typu danych.
6. Rozpowszechnienie produktu.

Dalsze kierunki działań związane są także z opracowaniem schematu postępowania w procesie projektowo-konstrukcyjnym urządzeń rehabilitacyjnych, który uwzględniałby optymalizację topologiczną w procesie projektowania.



## Podziękowania

*Z szacunkiem i wdzięcznością w tym miejscu wspominam wszystkie osoby, które pojawiły się na mojej drodze życia i przyczyniły do mojego rozwoju naukowego i sukcesu tej pracy.*

*Szczególnie pragnę serdecznie podziękować moim promotorom – dr hab. inż. Markowi Wyleżołowi, prof. PŚ. oraz dr inż. Małgorzacie Muzalewskiej za wszystkie cenne wskazówki oraz konstruktywną krytykę i wsparcie merytoryczne okazane mi podczas ostatnich lat.*

*Dziękuję koleżankom i kolegom z Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn za ich koleżeńską postawę oraz pomoc w czasie prowadzenia badań i drukowania prototypu.*

*Jednocześnie składam serdeczne podziękowania moim drogim dziadkom – Jerzemu i Halinie Zozwerek za wikt i opierunek w czasie studiów doktoranckich, a także najbliższej rodzinie z Polski i Czech, których nieustające wsparcie moralne oraz motywacja do działania pomagały mi w chwilach zwątpienia.*

*Na koniec pragnę także serdecznie podziękować dzieciom, które współpracowały ze mną podczas procesu konstruowania i testowania pojazdu oraz ich rodzicom i opiekunom, którzy umożliwili weryfikację i walidację projektu i udzielili mi wielu cennych rad.*

*Dziękuję!*



## Literatura

1. Algarni, Mohammed & Ghazali, Sami. (2021). Comparative Study of the Sensitivity of PLA, ABS, PEEK, and PETG's Mechanical Properties to FDM Printing Process Parameters. *Crystals*. 11. 995. 10.3390/cryst11080995.
2. Altair Inspire <https://www.altair.com/inspire-applications/> [dostęp 07-02-2022]
3. Ansys Mechanical <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical> [dostęp 07-03-2022]
4. AUTODESK Fusion 360 <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/learn-support>
5. Bao D.W., Yan X., Snooks R., Xie Y.M.: Bioinspired Generative Architectural Design Form-Finding and Advanced Robotic Fabrication Based on Structural Performance; *Architectural Intelligence*, pp 147 - 170, 2020, Springer
6. Bao D.W., Yan X., Snooks R., Xie Y.M.: Design and Construction of an Innovative Pavilion Using Topological Optimization and Robotic Fabrication; [w:] *Proceedings of IASS Annual Symposium 2019* (5), 1-8
7. Będziński R.: *Biomechanika inżynierska. Wybrane zagadnienia*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1997
8. Bełzowski, A.: *Zasady doboru współczynników bezpieczeństwa konstrukcji z materiałów kompozytowych*; [w:] *Kompozyty (Composites)* 4(2004) 12; dostępne online: [https://kompozyty.ptmk.net/pliczki/pliki/semVIII\\_69.pdf](https://kompozyty.ptmk.net/pliczki/pliki/semVIII_69.pdf)
9. Bendsoe M.P., Sigmund O.: *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*; Berlin Heidelberg: Springer-Verlag 2003
10. Bendsoe, M., Kikuchi N.: Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method; *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 71, str. 197–224
11. Bergonzi, L.; Vettori, M.; Stefanini, L.; Alcamo, L.: *Different infill geometry influence on mechanical properties of FDM produced PLA*. IOP Conference Series Materials Science and Engineering 2021. Dostępne online: [www.doi.org/10.1088/1757-899X/1038/1/012071](http://www.doi.org/10.1088/1757-899X/1038/1/012071)
12. Burdi A. R., Huelke D. F., Snyder R. G., Lowrey G. H.: *Infants and Children in the Adult World of Automobile Safety Design: Pediatric and Anatomical Considerations for Design of Child Restraints*, J. Biomechanics, Vol. 2, pp. 267-280. Pergamon Press, 1969.
13. Chimiak M.: *Budowa i konserwacja urządzeń do przemieszczania osób niepełnosprawnych*; Wydawnictwo i Handel Książkami „KaBe”, Krosno 2013

14. Cooper R. A., Ohnabe H., Hobson D. A.: An Introduction to Rehabilitation Engineering, Taylor&Francis, New York 2007
15. Cotteleer M., Joyce J.: 3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth; Deloitte University Press; dostępne pod adresem:  
[https://www.cellular3d.com/images/marketresearch/SIMT\\_AM\\_Conference\\_Keynote-Oct2014.pdf](https://www.cellular3d.com/images/marketresearch/SIMT_AM_Conference_Keynote-Oct2014.pdf) [dostęp 09-01-2022]
16. Courant R., Robbins H.: Co to jest matematyka; Prószyński i Spółka, Warszawa 1998
17. [Cura Guide to the Best Infill Patterns | All3DP](#)
18. D'Andrea, Danilo & Risitano, Giacomo & Raffaele, Marcello & Cucinotta, Filippo & Santonocito, Dario. (2022). Damage assessment of different FDM-processed materials adopting Infrared Thermography. Frattura ed Integrita Strutturale. 16. 75-90. 10.3221/IGF-ESIS.62.06.
19. Dane demograficzne Głównego Urzędu Statystycznego <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/roczniki-statystyczne/roczniki-statystyczne/rocznik-demograficzny-2021,3,15.html> [dostęp 08-02-2023]
20. Dassault Systèmes – SIMULIA <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/tosca/structure/> [dostęp 07-02-2022]
21. Dietrych J.: Projektowanie i konstruowanie. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1974
22. Dietrych J.: Konstrukcja - struktura zewnętrzna - wymiar a postać konstrukcyjna. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1969
23. Dietrych J.: Konstrukcja i konstruowanie. Wydaw. Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1968
24. Dietrych J.: Kryteria i ich znaczenie, Bydgoszcz 1979
25. Dietrych J.: System i konstrukcja. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978
26. Dodziuk H.: Druk 3D/AM. Zastosowania oraz skutki społeczne i gospodarcze; Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2019
27. Drukarka Creality Ender 5 Plus <https://www.creality3dofficial.eu/products/creality-ender-5-plus-3d-printer> [dostęp 14-04-2023]
28. Drukarka Tronxy <https://www.tronxy3d.com/collections/x5sa-500-series/products/x5sa-500-pro-large-3d-printer> [dostęp 14-04-2023]
29. Elementy składowe wózka: koła 10" [https://www.decathlon.pl/p/kolo-10-przednie-do-rowerka-biegowego-mtb-runride/\\_R-p-201671?mc=8566233](https://www.decathlon.pl/p/kolo-10-przednie-do-rowerka-biegowego-mtb-runride/_R-p-201671?mc=8566233) [dostęp 20-05-2023]
30. Elementy składowe wózka: kółka obrotowe <https://habi.com.pl/produkt/kolka-do-mebl-fi-30-mm-obrotowe-czarne/> [dostęp 20-05-2023]

31. Elementy składowe wózka: tuleja ślizgowa z kołnierzem z igilduru®  
[https://www.igus.pl/product/64?artNr=GFM-03040-15&gad\\_source=1&gclid=EAIaIQobChMIhOGhpX2gQMVIpyDBx1KVgyAEAAAYASAAEgJ3XvD\\_BwE](https://www.igus.pl/product/64?artNr=GFM-03040-15&gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIhOGhpX2gQMVIpyDBx1KVgyAEAAAYASAAEgJ3XvD_BwE) [dostęp 20-05-2023]
32. Elementy składowe wózka: tuleje gwintowane  
<https://3dreaktor.pl/pl/c/Insertry-gwintowane/196> [dostęp 20-05-2023]
33. English T.: How CAD has Transformed the Engineering Design Process; dostępny pod adresem: <https://interestingengineering.com/how-cad-has-transformed-the-engineering-design-process> [dostęp 15-02-2022]
34. Erdmann W. S.: Inżynieria rehabilitacji ruchowej, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2016
35. Eryildiz, Meltem. (2022). Estimation of three-point bending behavior using finite element method for 3D-printed polymeric sandwich structures with honeycomb and reentrant core. *European Mechanical Science*. 6. 196-200. 10.26701/ems.1101832.
36. Ferreira, R.; Amatte, I.; Assis Dutra, T.; Bürger, D.: *Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers*. *Composites Part B: Engineering*. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.013>
37. Fiell Ch., Fiell P.: Design. Historia projektowania. Wyd. Arkady, Warszawa 2015
38. Filament PLA Multicolour Silk Jungle 0,8 kg  
<https://sklep.rosa3d.pl/product/pla-multicolour-silk-jungle-175mm-08kg/> [dostęp 14-04-2023]
39. Filament PLA Nebula Green Grass 3 kg <https://3dreaktor.pl/PLA/3D-Filament-Nebula-PLA-Green-Grass-3kg> [dostęp 14-04-2023]
40. Format STEP <https://www.adobe.com/pl/creativecloud/file-types/image/vector/step-file.html> [dostęp 16-04-2023]
41. Fredricson, H.: Structural Topology Optimisation: An Application Review; *International Journal of Vehicle Design* 37, 2005, str. 67–80
42. Fundacja „Krzyż Dziecka” Pisarzowice <http://krzyzdziecka.pl/>
43. Gedliczka A.: Atlas miar człowieka. Dane do projektowania i oceny ergonomicznej, Centralny Instytut Ochrony Pracy, Warszawa 2001
44. Gibson I., Rosen D., Stucker B.: Additive manufacturing technologies : 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing; Springer, New York 2015
45. Grupa wsparcia rodziców dzieci z niepełnosprawnością ruchową <https://www.facebook.com/groups/bellasumbas/> [dostęp 15-01-2022]

46. Gzik M. i in.: Biomechanika i inżynieria rehabilitacyjna; Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, 2015
47. Huang X., Xie Y.M.: Evolutionary Topology Optimization Of Continuum Structures – Methods And Applications; Wielka Brytania: John Wiley & Sons 2010
48. Huang, X., Xie, Y.M. (2010). Evolutionary topology optimization of continuum structures: methods and applications. John Wiley & Sons.
49. Hulajnoga – VSB <https://mobilmania.zive.cz/clanky/v-ostrave-vytiskli-prvni-kolobezku-na-svete/sc-3-a-1344550> [dostęp 17-01-2022]
50. Hulajnoga <https://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodajstvi/vsb-tu-ostava-predstavuje-novy-bionicky-design-kolobezky-z-3d-tiskarny-na-mezinarodnim-strojirenskem-veletrhu-v-brne-48197.html> [dostęp 22-06-2020]
51. Hulajnoga <https://www.vsb.cz/cs/detail-novinky?reportId=38181> [dostęp 22.06.2020]
52. Jabłoński J. (red.): Ergonomia produktu. Ergonomiczne zasady projektowania produktów; Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2006
53. Jakobsson L., Isaksson-Hellman I., Lundell B.: *Safety for the Growing Child—Experiences from Swedish Accident Data*. 2005. Dostępny online: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.541.3024&rep=rep1&type=pdf> [dostęp 05-07-2022]
54. Jancar L., Pagac M., Mesicek J., Stefek P.: Design Procedure of a Topologically Optimized Scooter Frame Part; *Symmetry* 2020, 12(5); [dostępne pod adresem: <https://doi.org/10.3390/sym12050755> ]
55. Jasiak A., Swereda D.: Ergonomia osób niepełnosprawnych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005
56. John-Banach, M.; John, A.; Száva, I.; Vlase, S. *Three-Dimensional Printing Component Used in Rehabilitation Exoskeleton*. *Symmetry* 2022, 14, 1834. <https://doi.org/10.3390/sym14091834>
57. Kabsch A, Mikołajczyk W.: Pożądane kierunki rozwoju technicznego wspomaganie procesu rehabilitacji chorych i niesprawnych. II Sympozjum Inżynieria Ortopedyczna i Protetyczna - IOP'99, Białystok 1999, str. 135-142
58. Karta charakterystyki filamentu Nebula PLA <https://nebulafilaments.com/en/premium-2/#section-with-slide> [dostęp 7-06-2023]
59. Karta charakterystyki filamentu Prusa PLA <https://www.prusa3d.com/pl/kategoria/pla/> [dostęp 7-06-2023]
60. Karta charakterystyki filamentu Rosa PLA <https://rosa3d.pl/portfolio-items/plastarter-2/> [dostęp 7-06-2023]

61. Karta charakterystyki filamentu Ultimaker PLA <https://ultimaker.com/materials/method-series-pla/> [dostęp 7-06-2023]
62. Katalog firmy Cosmotech <https://www.cosmotech-3d.com/> [dostęp 25-06-2020]
63. Katalog sklepu internetowego – Bumbo Chair <https://www.pinkorblue.pl/> [dostęp 15-02-2021]
64. Kiwerski J. (praca zbiorowa): Rehabilitacja medyczna, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 2006
65. Klahn, Ch., Singer, D., Meboldt, M.: Design Guidelines for Additive Manufactured Snap-Fit Joints, *Procedia CIRP*, Volume 50, 2016, pp. 264-269. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.130>.
66. Klasyfikacja wyrobów medycznych <https://www.gov.pl/web/zdrowie/klasyfikacja-wyrobow-medycznych> [dostęp 09-09-2023]
67. Korczak, J.: Jak kochać dziecko. Dziecko w rodzinie. Warszawa 2012.
68. Krzesło Bone Chair <https://www.jorislaarman.com/work/bone-chair/> [dostęp 16-01-2022]
69. Kuczek T.: Application of manufacturing constraints to structural optimization of thin-walled structures; Taylor & Francis; Engineering Optimization, 2015
70. Kuczek T.: Ograniczenia produkcyjne w optymalizacji topologicznej inżynierskich konstrukcji ramowych; Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki, Kraków 2019
71. Kutyłowski R.: Optymalizacji topologii kontinuum materialnego; Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004
72. Lewandowski J., Leczewicz-Bartoszewska J. - praca zbiorowa: Ergonomia niepełnosprawnym, Monografie, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2006
73. Majowiecki M.: Osobiste doświadczenia z architekturą strukturalną: od poszukiwania formy do projektowania „free form”; [w:] *Architectus* 4(40) 2014, s.79-92
74. Marciniak J., Szewczenko A.: Sprzęt szpitalny i rehabilitacyjny, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003
75. Mesicek J., Jancar L., Quoc-Phu Ma, Hajnys J., Tanski T., Krpec P., Pagac M.: Comprehensive View of Topological Optimization Scooter Frame Design and Manufacturing; [w:] *Symmetry* 13(7):1201, Lipiec 2007
76. Mierzendeudel ,A.M.; Suresh, K.; *A hands-on introduction to Topology Optimization*. First Edition. CreateSpace Independent Publishing Platform, USA 2017

77. Mikulíková A., Wyleźoł M.: Projektowanie generatywne i optymalizacja topologiczna w procesie projektowo-konstrukcyjnym; [w:] Mołdoch-Mendoń I., Skrzątek K. (eds.): Nowoczesne technologie - strategie, rozwiązania i perspektywy rozwoju, 2021, Lublin, Wydaw. Naukowe TYGIEL, str. 286 – 296
78. Mikulikova, A., Mesicek, J., Karger, J., Hajnys, J., Ma, Q.-P., Sliva, A., Smiraus, J., Srnicek, D., Cienciala, S., Pagac, M. 2023. *Topology optimization of the clutch lever manufactured by additive manufacturing*. Materials 16, 1–20.
79. Mikulikova, A., Wyleźoł, M., Muzalewska, M. *Optymalizacja topologiczna konstrukcji wyrobów rehabilitacyjnych*. In: Nyćkowiak J, Leśny J, editors. *Badania i rozwój młodych naukowców w Polsce. Nauki techniczne i inżynieriyjne. Część I. Młodzi Naukowcy*; 2022. str.. 53–61.
80. Milewski J.O.: Additive manufacturing of metals. From fundamental technology to rocket nozzles, medical implants, and custom jewelry; Springer, Springer Series in Material Science vol. 258, 2017
81. Motocykl Light Rider <https://www.altair.com/news/altair-and-airbus-apworks-team-up-to-make-additive-manufacturing-a-reality-for-customers> [dostęp 18-01-2022]
82. Motocykl Light Rider <https://www.dezeen.com/2016/06/06/light-rider-apworks-3d-printed-electric-motorcycle-aluminium/#> [dostęp 18-01-2022]
83. Motocykl Light Rider <https://www.wired.com/2016/06/light-rider-motorcycle-weighs-just-77-pounds-costs-um-56k/> [dostęp 18-01-2022]
84. Muzalewska M., Moczulski W.: Methodology of optimization of the design of an orthopedic implant. *Mach. Dyn. Res.* 39, 2015: str. 131–144
85. Oficjalny portal FireFly <https://www.fireflyfriends.com/eu2/scooot> dostęp [16-01-2022]
86. Oficjalny portal Zchair LLC <https://www.zipzac.com/> dostęp [16-01-2022]
87. Olesen Ch., de Zee M., Rasmussen J.: *Pilot Validation of a Computal Seated Human Model Using an Instrumented Chair*. Health Canada Science Forum 2008. Book of Abstracts. Dostępny online: [https://www.researchgate.net/publication/233782754\\_Pilot\\_Validation\\_of\\_a\\_Computal\\_Seated\\_Human\\_Model\\_Using\\_an\\_Instrumented\\_Chair](https://www.researchgate.net/publication/233782754_Pilot_Validation_of_a_Computal_Seated_Human_Model_Using_an_Instrumented_Chair) [dostęp 18-04-2023]
88. Optymalizacja topologiczna części lotniczych: <https://staleo.pl/z-kraju-i-ze-swiata/technologie/3353/optymalizacja-topologiczna-czesci-lotniczych> [dostęp 18-02-2022]
89. Ostwald M.: *Podstawy optymalizacji konstrukcji*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005
90. Patyk R. i in.: Topologiczna optymalizacja konstrukcji na przykładzie widłaka wału przegubowego; [w:] *Autobusy, Technika, Eksploatacja, Systemy transportowe*, nr 5/2012 s. 382

91. Pliki formatu STL <https://www.adobe.com/creativecloud/file-types/image/vector/stl-file.html#stl> [dostęp 14-04-2023]
92. **PN-92/Z-80000** Wózki inwalidzkie. Terminologia / Wheelchairs. Nomenclature, terms and definitions IDT ISO 6440:1985
93. **PN-92/Z-80001** Wózki inwalidzkie. Gabaryty / Wheelchairs. Maximum overall dimensions IDT ISO 7193:1985
94. **PN-92/Z-80002. 05** Wózki inwalidzkie. Wyznaczanie gabarytów masy i przestrzeni skrętu / Wheelchairs. Determination of overall dimensions, mass and turning space IDT ISO 7176-5:1986
95. **PN-92/Z-80003** Wózki inwalidzkie. Klasyfikacja na podstawie cech konstrukcyjnych / Wheelchairs. Type classification based on appearance characteristics IDT ISO 7930:1986
96. **PN-EN 12183:2014** Wózki inwalidzkie napędzane ręcznie. Wymagania i metody badań.
97. **PN-EN ISO 9999: 2001** Pomoce techniczne dla osób niepełnosprawnych. Klasyfikacja Technical aids for disabled persons. Classification IDT EN ISO 9999:1998
98. **PN-ISO 7176-11: 1998** Wózki inwalidzkie. Manekiny do badań / Wheelchairs. Part 11: Test dummies IDT ISO 7176-11:1992
99. **PN-ISO 7176-13: 1998** Wózki inwalidzkie. Wyznaczanie współczynnika tarcia powierzchni do badań / Wheelchairs. Part 13: Determination of coefficient of friction of test surfaces IDT ISO 7176-13:1989
100. Pojazd „The GoBro” <https://www.frogmobilityllc.com/the-gobro.html#/> [dostęp 05-07-2022]
101. Połączenia zatrzaskowe <https://www.mechical.com/2023/01/snap-fit.html> [dostęp 27-10-2022]
102. Poszwa P., Szostak M.: Optymalizacja topologiczna projektowania wyrobów wytwarzanych metodą wtryskiwania tworzyw sztucznych; Mechanik 11/2017, str. 948-950
103. Ranking wózków <https://www.rehabmart.com/post/top-5-best-pediatric-wheelchairs> [dostęp 11-02-2021]
104. Raport z Bazy Danych Polskiego Rejestru Wrodzonych Wad Rozwojowych (PRWWR) dotyczący urodzenia w Polsce w latach 2002-2019 dzieci z Rozszczepem kręgosłupa Q05 [www.rejestrwad.pl](http://www.rejestrwad.pl) [dostęp 08-02-2023]
105. Rdzeniowy zanik mięśni SMA <https://www.fsma.pl/rdzeniowy-zanik-miesni/> [dostęp 08-02-2023]
106. Reis P., Volpini M., Pimenta J., Guimarães I., Evelise C., Monteiro M., Campos Rubio J. C.: Resting hand splint model from topology optimization to be produced by additive manufacturing; Rapid Prototyping Journal, 5 September 2021



107. Ronga Y., Zhaoab Z.L., Fengc X.Q., Xiea Y.M.: Structural topology optimization with an adaptive design domain; Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 389, February 2022 [dostępny: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2021.114382> ]
108. Rosner J., Podstawy ergonomii, PWN, Warszawa, 1982.
109. Rozvany G. I. N.: Topology Optimization in Structural Mechanics; Essen University, Springer- Verlag, Wiedeń 2014
110. Schemat działania urządzenia FDM <https://www.order3d.pl/metody-druku-3d> [dostęp 11-09-2023]
111. Siemiński P., Budzik G.: Techniki przyrostowe: druk drukarki 3D; Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2015.
112. Sobolewski J.Z.: Techniki wytwarzania. Technologie bezwiórowe; Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2011
113. Solidworks Simulation <https://www.solidworks.com/media/topology-optimization> [dostęp 07-02-2022]
114. SOSW Dąbrowa Górnicza <https://sosw.dg.pl/> [dostęp 1-10-2023]
115. Standardy WHO <https://www.who.int/tools/child-growth-standards/standards> [dostęp 05-07-2022]
116. Stare modele wózków inwalidzkich <https://wynalazki.andrej.edu.pl/wynalazki/38-w/663-wozek-inw> [dostęp 02-02-2022]
117. Sydor M.: Wybór i eksploatacja wózka inwalidzkiego; Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego, Poznań 2003
118. Tarnowski W.: Optymalizacja i polioptymalizacja w technice, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2011
119. Tichauer E.R.: The Biomechanical Basis of Ergonomics: anatomy Applied to the Design of Work Stations, John Wiley, New York, 1978.
120. Ulitmaker Cura <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura> [dostęp 14-04-2023]
121. Vukasovic, T., Vivanco, J., Celentano, D., Garcia-Herrera, C. *Characterization of the mechanical response of thermoplastic parts fabricated with 3D printing*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 104/2019 1-12. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04194-z>
122. Wilhide E.: Historia Designu; Wydawnictwo Arkady, Warszawa 2017
123. Winkler T.: Komputerowo wspomagane projektowanie systemów antropotechnicznych, WNT, Warszawa, 2005.

124. Wózek Action3 <https://www.akson.pl/produkt/wozek-inwalidzki-dzieciocy-reczny-specjalny-action3-junior-invacare,1176?r=c460> [dostęp 03-07-2020]
125. Wózek aktywny <https://metro.co.uk/2018/09/18/hacking-disability-the-woman-revolutionising-the-wheelchair-7951254/> [dostęp 02-02-2022]
126. Wózek Bumbas <https://www.instructables.com/DIY-Bumbo-Wheelchair-for-Kids/> [dostęp 15-02-2022]
127. Wózek GO <https://layerdesign.com/project/go-3/#top-page> [dostęp 22-06-2020]
128. Wózek GTM Junior <http://wozki-inwalidzkie-dla-dzieci.blogspot.com/2015/08/aktywny-wozek-inwalidzki-dla-dzieci.html> [dostęp 06-02-2022]
129. Wózek GTM Kid <https://www.ortlife.pl/wozki-inwalidzkie/dzieciocy/wozek-GTM-Kid.html> [dostęp 04-07-2020]
130. Wózek GTM Smyk <https://www.ortlife.pl/wozki-inwalidzkie/dzieciocy/wozek-Gtm-Smyk.html> [dostęp 06-02-2022]
131. Wózek GTM Tennis <https://helpik24.pl/wozki-inwalidzkie-sportowe/7106-wozek-inwalidzki-sportowy-gtm-open-tenis-gtm-mobil.html> [dostęp 20-12-2023]
132. Wózek Meyra Brix <https://www.recare.co.uk/paediatrics-and-teens/manual-wheelchairs/meyra-brix-children-wheelchair?id=584&pid=27> [dostęp 11-01-2022]
133. Wózek Offcar Funky – Mobilex <https://www.mobilex.pl/produkty/wozki-inwalidzkie/wozki-inwalidzkie-aktywne/offcarr-funky/> [dostęp 07-02-2022]
134. Wózek Panthera Micro <http://grupamazamed.pl/wozek-inwalidzki-aktywny-dzieciocy-panthera-micro/> [dostęp 04-07-2020]
135. Wózek Quickie Zippie Kidz <https://www.quickie-wheelchairs.com/Pediatric-Wheelchairs/Zippie-Kidz/1546p> [dostęp 06-02-2022]
136. Wózek Sagitta Kids <http://grupamazamed.pl/wozek-inwalidzki-aktywny-dzieciocy-sagitta-kids-si/> [dostęp 04-07-2020]
137. Wózek Tornado <https://mediplus.pl/wozki-inwalidzkie-aktywne/133-wozek-aktywny-tornado.html> [dostęp 10-06-2020]
138. Wózek wydrukowany 3D <https://www.tctmagazine.com/3d-printing-news/3d-printing-generative-design-custom-wheelchair/> [dostęp 22-06-2020]
139. Wózek Zippie Simba <https://www.ortopedio.pl/sprzet-rehabilitacyjny-dla-dzieci/dzieciocy-wozek-inwalidzki-aktywny-zippie-simba/> [dostęp 04-07-2020]
140. Wpływ środowiska na filament PLA [How Long Does PLA Last? Does It Expire? - MonoFilament DIRECT](https://www.monofilamentdirect.com/en/How-Long-Does-PLA-Last-Does-It-Expire?) [dostęp 14-04-2023]

141. Wyleżoł M.: Inżynieria odwrotna w doskonaleniu konstrukcji, Modelowanie Inżynierskie, Tom 1, nr 32, p. 485-490, Gliwice, 2006
142. Wyleżoł M.: Inżynieria odwrotna w zastosowaniach ergonomicznych, Agencja Wydawnicza SIMP, Mechanik nr 11/2006, Warszawa, 2006, str. 934-935
143. Xie, Y. M., Steven, G. P. (1993). A simple evolutionary procedure for structural optimization. *Computers & structures*, 49(5), 885-896.
144. YAVUZ, Gizem & Kıral, Binnur & KATRE, Samet & Atilla Yolcu, Dilek. (2021). Effects of Topology and Material on Mechanical Properties of Structures Produced by the Additive Manufacturing Method. *Deu Muhendislik Fakultesi Fen ve Muhendislik*. 23. 755-765. 10.21205/deufmd.2021236905.
145. Zhou, M., Fleury R., Patten S., Stannard N., Mylett D.: Topology Optimization – Practical Aspects for Industrial Applications; Proceedings of the 9th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Czerwiec 2011, Shizuoka, Japan; str. 13–17
146. Zhu JH., Zhang WH., Xia L.: Topology Optimization in Aircraft and Aerospace Structures Design; *Archives of Computational Methods in Engineering*, Springer 2015
147. ZipZac <https://www.zipzac.com/about> [dostęp 16-03-2022]
148. Złowodzki M. (red.): Ergonomia wobec wyzwań nowych technik i technologii; Wydawnictwo PK, Kraków 2016

## Streszczenie

Niniejsza rozprawa doktorska dotyczyła synergicznego połączenia kilku dyscyplin: inżynierii mechanicznej, ergonomii, optymalizacji topologicznej oraz wytwarzania addytywnego. Wszystkie te dziedziny posłużyły do opracowania konstrukcji oraz wytworzenia prototypu autorskiego pojazdu napędzanego ręcznie, służącego do samodzielnego przemieszczania się dzieci z niepełnosprawnością ruchową kończyn dolnych w wieku od ok. 9 miesiąca życia do ok. 4 lat.

W przeglądzie literatury przeanalizowano historię i konstrukcję wózków inwalidzkich oraz przeprowadzono analizę rozwiązań dostępnych na rynku i skierowanych dla najmłodszych użytkowników.

Kluczowe zagadnienia związane z procesem projektowo-technologicznym obejmowały m.in. analizę istniejących badań dotyczących zastosowań optymalizacji topologicznej w procesie konstruowania oraz przegląd technologii wytwarzania ze szczególnym uwzględnieniem technologii FDM.

Zakres merytoryczny dysertacji obejmuje część projektowo-technologiczną oraz część badawczą. Część pierwsza dotyczyła etapów: koncipowania, projektowania, konstruowania oraz wytworzenia w pełni funkcjonalnego prototypu pojazdu za pomocą technologii FDM. Natomiast część badawcza dotyczyła procesu optymalizacji topologicznej rozkładu tworzywa we wnętrzach poszczególnych komponentów pojazdu (przy zachowaniu wcześniej ustalonych form zewnętrznych) w kontekście różnych stanów obciążeń wózka. Wszystkie w ten sposób uzyskane postaci elementów wózka zostały zweryfikowane wytrzymałościowo z użyciem metody analizy elementów skończonych przy różnych stanach obciążeń.

Jak wcześniej wspomniano, głównym celem projektowym rozprawy doktorskiej było skonstruowanie pojazdu manualnego przeznaczonego dla dzieci z dysfunkcją kończyn, który napędzany ręcznie zapewni dzieciom samodzielność w przemieszczaniu się. W konstrukcji pojazdu uwzględniono przede wszystkim niezbędne cechy ergonomiczne, aby zapewnić łatwość jego użytkowania przy uwzględnieniu zmieniających się rozmiarów użytkownika.

Przeprowadzone badania skoncentrowały się na wykorzystaniu optymalizacji topologicznej jako narzędzia programowego do uzyskania pożądanego rozkładu tworzywa we wnętrzach funkcjonalnych komponentów pojazdu. Głównym kryterium optymalizacji topologicznej wypełnień poszczególnych elementów była redukcja ich masy przy jednoczesnym zachowaniu ich wytrzymałości i pożądanej funkcjonalności.

Ponadto pojazd został tak skonstruowany, aby mógł być wytwarzany za pomocą najpopularniejszej współcześnie technologii generatywnej – FDM.

Głównym celem naukowym rozprawy była ocena skuteczności zastosowania optymalizacji topologicznej rozkładu tworzywa we wnętrzach poszczególnych komponentów pojazdu na wszystkich etapach realizacji procesów: projektowania i wytwarzania. Osobnym zagadnieniem była ocena wpływu parametrów druku FDM na wytrzymałość i jakość uzyskanych elementów. Badania obejmowały więc wykonanie szeregu symulacji różnych konfiguracji wypełnienia wewnątrz modeli komponentów wózka oraz ocenę ich wpływu na właściwości mechaniczne docelowych komponentów.

Analiza uzyskanych wyników wykazuje, że zastosowanie optymalizacji topologicznej pozwala na pożądaną redukcję mas komponentów przy jednoczesnym zachowaniu ich wytrzymałości i funkcjonalności. Wykonano modele wirtualne elementów z odwzorowaniem wszystkich cech charakterystycznych dla wytwarzania z użyciem technologii FDM oraz efektów optymalizacji topologicznej. Chodzi tu o postaci modeli zawierających dokładne odwzorowanie struktur wypełnienia będących boolowskim iloczynem połączenia postaci pochodzących od optymalizacji topologicznej oraz od wypełnień siatkowych typu grid o gęstości 20%. Modele takie zostały poddane analizie wytrzymałościowej. Wyniki analizy numerycznej porównano z modelami o wypełnieniu standardowym siatkowym (typu grid), o gęstości 20%, pełnym oraz skorupowym. Porównanie wyników pozwoliło ocenić skuteczność zastosowanej metody. Analiza wyników przeprowadzonych badań potwierdziła słuszność postawionych też:

- 1) Możliwe jest wytworzenie w pełni funkcjonalnego urządzenia rehabilitacyjnego za pomocą najpowszechniejszej oraz stosunkowo najtańszej technologii przyrostowej - FDM, co ma wpływ na cenę końcową oraz popularyzację możliwości wytwarzania tego typu urządzeń.
- 2) Optymalizacja topologiczna wypełnienia elementów użytkowych autorskiego urządzenia - wytwarzanych za pomocą technologii przyrostowej FDM – umożliwiła uzyskanie struktury wypełnienia odpowiednio wytrzymałej w kontekście zdefiniowanych przypadków obciążeń oraz pozwoliła na minimalizację masy urządzenia.

Wnioski z przeprowadzonych badań potwierdzają obiecujące perspektywy zastosowania optymalizacji topologicznej i technologii druku FDM w projektowaniu i wytwarzaniu obiektów będących dziedziną zainteresowania niniejszej dysertacji.

Dalsze badania powinny skupić się głównie na rozwoju optymalizacji w procesach konstruowania i wytwarzania oraz walidacji opracowanych metod projektowania i analizy w praktycznych zastosowaniach przemysłowych.

Słowa kluczowe: *pojazd dla dzieci z niepełnosprawnością ruchową, Inżynieria Mechaniczna, Inżynieria Rehabilitacyjna, Komputerowe Wspomaganie Projektowania CAD, Druk 3D, Technologie Addytywne, Optymalizacja Topologiczna, Dizajn, Projektowanie Skoncentrowane na Użytkownika, PLA, FDM.*

## Summary

This doctoral dissertation concerned the interdisciplinary research of several areas: mechanical engineering, ergonomics, topology optimization and additive manufacturing. A multidisciplinary approach was used to construct and create a prototype of a manually propelled mobility aid, which helps children with motor impairment of the lower limbs aged from approximately 9 months to approximately 4 years to move independently.

Literature review examines the history and development of wheelchairs construction and also shows a market analysis of available products dedicated to children.

Key topics related to the research include case studies of topologically optimized products and manufacturing technologies for producing optimized structures, especially by using FDM additive technology.

The scope of the dissertation includes design, technology and research. The first part concerns the engineering design process from the conception phase to the manufacturing of a fully functional mobility chair prototype by using FDM technology. Research analyzes the process of topology optimization of the infill material distribution inside individual vehicle components (while maintaining previously designed external form) in the context of various loading conditions. All the forms of the vehicle elements obtained in this way were computationally verified using the finite element analysis at various load cases.

As previously mentioned, the main design goal of the dissertation was to construct a manual wheelchair intended for children with lower limb dysfunction, which, when propelled manually, will provide children with independence when moving around. The mobility aid is designed with necessary adjustable features to ensure ease of use considering the changing size of the growing user.

Research focuses on the application of topology optimization as a software tool to obtain the desired infill distribution inside functional vehicle components. The main criterion for topology optimization of the elements' infill was to reduce their weight while maintaining their strength and desired functionality.

In addition, the mobility chair has been designed to be manufactured using the most popular generative technology today - FDM.

The main scientific goal of the dissertation was to assess the effectiveness of topology optimization of material distribution inside vehicle components at all stages of the processes: design and manufacturing. A separate issue was the assessment of the impact of FDM printing parameters on the strength and quality of the obtained elements. The research included a number of simulations of various infill configurations of 3D printed components and assessment of their impact on the mechanical properties.

The analysis of the obtained results shows that the use of topology optimization allows for the desired weight reduction of components while maintaining their strength and functionality. Virtual models of elements were designed including all features characteristic for FDM manufacturing and topologically optimized structure. These are the forms of models containing an accurate 3D representation of the infill structures, which are the outcome of Boolean operations of the combination of the forms derived from topology optimization and grid infill with a density of 20%. Such models have been FEM analyzed. The results of the numerical analysis were compared with models with a standard infill (grid type with a density 20%), full models and shell models. Comparison of the results allowed us to assess the effectiveness of the method used. The analysis of the research results confirmed the validity of the theses:

1) It is possible to manufacture a fully functional rehabilitation device using the most common and relatively cheapest additive technology - FDM, which affects the final price and popularizes the possibility of producing this type of device.

2) Topology optimization of the infill of functional elements - manufactured using FDM additive technology - made it possible to obtain an infill structure that was sufficiently durable in the context of defined load cases and allowed for minimizing the weight of the device.

The conclusion from the conducted research confirms promising prospects for the use of topology optimization and FDM printing technology in the design and manufacturing of functional elements. Furthermore, this dissertation demonstrates the feasibility and potential of using FDM additive technology in the design and manufacture of a fully functional rehabilitation device for children.

Further research should focus on the optimization of FDM printing processes and the validation of the developed design and analysis methods in practical industrial applications. In addition, further stages of research related to



a manual mobility chair should involve carrying out physical strength tests of individual elements.

Key words: *mobility aid for children with disabilities, Mechanical Engineering, Rehabilitation Engineering, Computer-Aided Design, CAD, 3D Printing, Additive Technologies, Topology Optimization, Design, Human-Centered Design, PLA, FDM.*