



Co-funded by  
the European Union



# TECH-HEALTH Toolkit

## Innowacyjne technologie druku 3D dla pracowników ochrony zdrowia

*Przewodnik dla kształcenia i szkolenia zawodowego*



Bonifraterskie  
Centrum Medyczne



Co-funded by  
the European Union

This work is licensed under CC BY-NC-SA 4.0

Training Educational Course on innovative HEALTHcare technologies.

KA210-VET - Small-scale partnerships in vocational education and training (KA210-VET).

Project Number: 2024-1-PL01-KA210-VET-000243362

Co-Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the Foundation for the Development of the Education System (FRSE). Neither the European Union nor FRSE can be held responsible for them.



Fundación  
**San Juan de Dios**  
Madrid

*Gemma Escobar Aguilar*  
*María Simarro González*  
*Manuel Lara Romero*  
*Pedro Chana Valero*



## SPIS TREŚCI

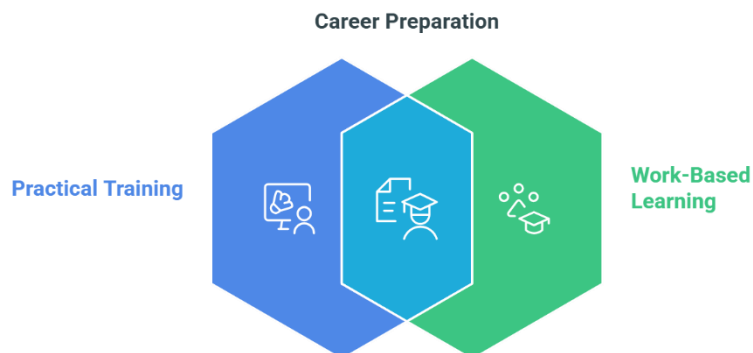
- 1. Wprowadzenie**
  - 1.1 Cel dokumentu
  - 1.2 Dlaczego druk 3D zmienia opiekę zdrowotną
- 2. Podstawy technologiczne: zasady i kluczowe zalety**
  - 2.1 Podstawy druku 3D
  - 2.2 Materiały
  - 2.3 Kluczowe zalety w ochronie zdrowia
- 3. Kliniczne zastosowania druku 3D**
  - 3.1 Protezy i ortotyka
  - 3.2 Modele anatomiczne i prowadnice chirurgiczne
  - 3.3 Spersonalizowane implanty
  - 3.4 Spersonalizowane urządzenia medyczne
  - 3.5 Oplącalna i zdecentralizowana produkcja
  - 3.6 Szersze zastosowania specjalistyczne
- 4. Innowacje i przyszłe trendy: biodruk i medycyna regeneracyjna**
  - 4.1 Inżynieria tkanek i narządów
  - 4.2 Modelowanie chorób i testowanie leków
  - 4.3 Medycyna regeneracyjna i inżynieria rusztowań
  - 4.4 Inteligentne terapie i mikrorobotyka
- 5. Implikacje edukacyjne i szkoleniowe**
- 6. Wyzwania i aspekty do rozważenia**
  - 6.1 Zgodność z regulacjami
  - 6.2 Kwestie etyczne
  - 6.3 Zrównoważony rozwój środowiskowy
  - 6.4 Dostępność ekonomiczna
  - 6.5 Skalowalność
- 7. Mapowanie europejskich hubów innowacji zdrowotnych**
- 8. Bibliografia**



## 1. WPROWADZENIE

### 1.1 Cel niniejszego dokumentu

Kształcenie i szkolenie zawodowe zapewnia osobom praktyczne umiejętności, wiedzę oraz kompetencje niezbędne do skutecznego wykonywania określonych zawodów lub profesji, koncentrując się na praktycznej nauce i uczeniu opartym na doświadczeniu zawodowym, często łącząc nauczanie w klasie z praktycznymi doświadczeniami w rzeczywistych środowiskach pracy.



### Główne cele

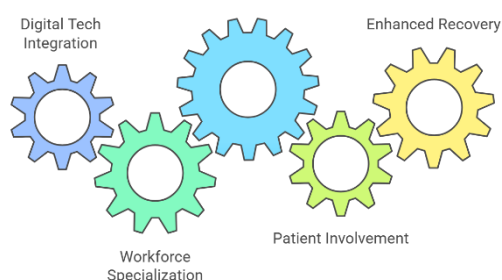
**Building Skills**  
Align competencies to the evolving jobs and the digital transition.

**Innovative Methodologies**  
Encourage new methods in 3D printing for healthcare.

**Good Practices Toolkit**  
Create a resource of best practices for 3D printing and participatory models in healthcare.

### Grupa docelowa

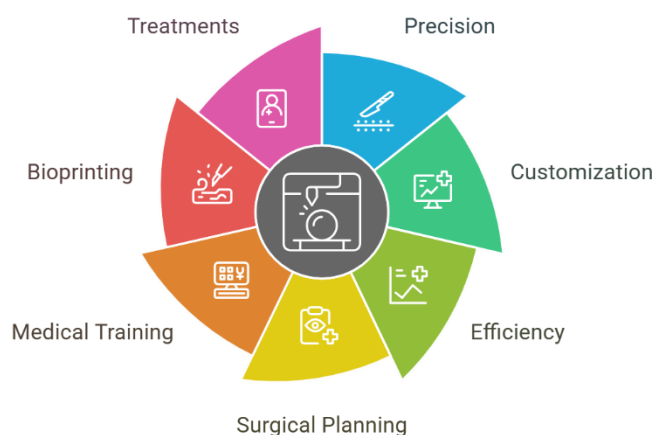
Rosnąca rola technologii cyfrowych w obszarze medycyny wymaga wyższego poziomu specjalizacji wśród pracowników ochrony zdrowia. Pośrednimi grupami docelowymi są pacjenci przebywający w szpitalach i placówkach opieki zdrowotnej.



## 1.2 Dlaczego druk 3D zmienia opiekę zdrowotną

### 1.2.1 Transformacyjny potencjał druku 3D

Druk 3D, czyli produkcja addytywna, redefiniuje współczesną opiekę zdrowotną, oferując niespotykany dotąd poziom precyzji, personalizacji i efektywności w opracowywaniu rozwiązań medycznych. Ta przełomowa technologia umożliwia szybkie wytwarzanie złożonych struktur na podstawie projektów cyfrowych, ułatwiając tworzenie spersonalizowanych urządzeń medycznych, protez, implantów, a nawet tkanek bioinżynieryjnych (Rysunek 1). Elastyczność druku 3D rewolucjonizowała planowanie chirurgiczne, edukację medyczną oraz medycynę regeneracyjną, czyniąc tę technologię nieodzownym narzędziem współczesnej opieki zdrowotnej (1–5,11). Zdolność do tworzenia rozwiązań dostosowanych do indywidualnych potrzeb pacjenta przyczyniła się do szerokiego zastosowania druku 3D w medycynie, umożliwiając rozwiązywanie złożonych problemów klinicznych z niespotykaną wcześniej precyzją (5–10).



Rysunek 1: Korzyści druku 3D w naukach o zdrowiu

Istotną zaletą druku 3D w opiece zdrowotnej jest jego zdolność do dostosowywania się do specyficznych cech anatomicznych i fizjologicznych każdego pacjenta, co stanowi fundamentalną zmianę w medycynie spersonalizowanej (1,6,11). Takie indywidualne podejście zapewnia, że protezy, implanty i modele medyczne oferują optymalne dopasowanie, poprawiając zarówno funkcjonalność, jak i komfort pacjenta. Ponadto druk 3D umożliwia szybkie prototypowanie i iteracyjne testowanie, pozwalając badaczom i klinicyście na udoskonalanie projektów w czasie rzeczywistym oraz przyspieszenie procesu innowacji (9,11–14).

Wraz z dalszym rozwojem technologii oczekuje się, że druk 3D będzie odgrywał jeszcze większą rolę w opiece zdrowotnej. Integracja sztucznej inteligencji (AI) i uczenia maszynowego z procesami druku 3D prawdopodobnie usprawni automatyzację, optymalizację materiałów oraz modelowanie predykcyjne, jeszcze bardziej doskonaląc rozwiązania medyczne skoncentrowane na pacjencie. Dzięki postępowi badań oraz współpracy inżynierów, naukowców biomedycznych i



pracowników ochrony zdrowia wdrażanie druku 3D w medycynie będzie się nadal przyspieszać, rewolucjonizując zarówno metody leczenia, jak i modele opieki nad pacjentem (9,11,11,12,14).

Kolejnym przełomowym aspektem jest efektywność kosztowa. Tradycyjne metody wytwarzania spersonalizowanych urządzeń medycznych wymagają kosztownych form oraz długiego czasu produkcji, co ogranicza ich dostępność. Natomiast druk 3D ogranicza ilość odpadów materiałowych i umożliwia lokalną produkcję, znacząco obniżając całkowite koszty. Szybkość wytwarzania dodatkowo zwiększa atrakcyjność tej technologii, ponieważ złożone modele anatomiczne i narzędzia chirurgiczne mogą być produkowane w ułamku czasu potrzebnego przy zastosowaniu konwencjonalnych metod (9,11,11,12,14). Taka efektywność ma szczególne znaczenie w sytuacjach nagłych w medycynie, gdzie szybki dostęp do spersonalizowanych urządzeń może znacząco poprawić wyniki leczenia.

Możliwość wytwarzania spersonalizowanych rozwiązań medycznych na żądanie stanowi kolejną kluczową zaletę druku 3D. W przeciwieństwie do metod tradycyjnych, które często wymagają długiego czasu realizacji i kosztownych form, produkcja addytywna usprawnia proces wytwarzania, umożliwiając szybkie prototypowanie oraz wprowadzanie zmian w czasie rzeczywistym. Ta elastyczność pozwala pracownikom ochrony zdrowia opracowywać terapie dostosowane do indywidualnych potrzeb anatomicznych i fizjologicznych pacjentów, poprawiając wyniki leczenia oraz zwiększając satysfakcję pacjentów (11,12,14,15).

### *1.2.2 Rola produkcji cyfrowej we współczesnej medycynie*

Produkcja cyfrowa, obejmująca druk 3D oraz inne zaawansowane techniki wytwarzania, redefiniuje współczesną medycynę poprzez wprowadzanie precyzji, elastyczności i innowacji do opieki nad pacjentem. Dzięki integracji cyfrowych procesów pracy pracownicy ochrony zdrowia mogą projektować, symulować i wytwarzać złożone struktury anatomiczne, spersonalizowane implanty, a nawet tkanki bioinżynieryjne z niespotykaną dotąd dokładnością (5,6,8).

Jednym z najważniejszych wkładów produkcji cyfrowej w medycynę jest jej zdolność do usprawniania planowania chirurgicznego. Chirurgowie mogą obecnie wykorzystywać modele anatomiczne drukowane w 3D, odwzorowujące indywidualną anatomię pacjenta, do ćwiczenia procedur przed ich wykonaniem, co zmniejsza ryzyko i poprawia wyniki leczenia. Zastosowanie to jest szczególnie korzystne w skomplikowanych zabiegach, takich jak neurochirurgia, ortopedia czy procedury rekonstrukcyjne, gdzie wysoka precyzja ma kluczowe znaczenie (6,16,17).



Ponadto produkcja cyfrowa umożliwia szybkie wytwarzanie spersonalizowanych protez i urządzeń ortotycznych. Tradycyjne procesy produkcji tych urządzeń są często kosztowne i czasochłonne, podczas gdy produkcja cyfrowa pozwala na tworzenie indywidualnie dopasowanych rozwiązań w znacznie krótszym czasie. Jest to szczególnie korzystne dla pacjentów pediatrycznych i pourazowych, którzy wymagają częstych modyfikacji swoich urządzeń w miarę wzrostu lub procesu zdrowienia (5,6,8).

Kolejnym przełomowym zastosowaniem produkcji cyfrowej jest biodruk, który rewolucjonizuje inżynierię tkankową i medycynę regeneracyjną. Naukowcy są obecnie zdolni do wytwarzania rusztowań tkankowych, organoidów, a nawet funkcjonalnych tkanek ludzkich przy użyciu specjalistycznych bioatramentów. Postępy te mają ogromny potencjał w zakresie testowania leków, modelowania chorób oraz – w przyszłości – tworzenia narządów hodowanych laboratoryjnie do transplantacji (5,6,8).

Produkcja cyfrowa wspiera również innowacje w rozwoju inteligentnych urządzeń medycznych. Noszone monitory zdrowia, systemy dostarczania leków oraz spersonalizowane implanty mogą być dostosowywane do indywidualnych potrzeb pacjentów, poprawiając skuteczność leczenia i przestrzeganie zaleceń terapeutycznych. Możliwość integracji elementów elektronicznych ze strukturami drukowanymi w 3D dodatkowo poszerza zakres zastosowań medycznych, umożliwiając monitorowanie stanu zdrowia w czasie rzeczywistym oraz automatyczne dostosowywanie terapii (5,6,8).

Wraz z dalszym rozwojem technologii produkcji cyfrowej będą one przyczyniać się do zmniejszania luki między badaniami medycznymi a praktyką kliniczną. Standaryzacja kształcenia w zakresie produkcji cyfrowej w edukacji medycznej oraz programach kształcenia zawodowego ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia, że pracownicy ochrony zdrowia zdobędą kompetencje niezbędne do skutecznego wykorzystania tych innowacji. Poprzez wspieranie współpracy interdyscyplinarnej między inżynierami, pracownikami ochrony zdrowia i naukowcami zajmującymi się materiałami, produkcja cyfrowa będzie nadal kształtować przyszłość współczesnej medycyny oraz poprawiać wyniki zdrowotne na całym świecie.



## 2. Podstawy technologiczne: zasady i kluczowe zalety

Druk trójwymiarowy (3D) jest technologią produkcji addytywnej, która tworzy fizyczne obiekty poprzez nakładanie materiałów w kolejnych warstwach na podstawie projektu cyfrowego. W przeciwieństwie do metod produkcji subtraktywnej, które polegają na usuwaniu materiału z litego bloku, produkcja addytywna buduje geometrię poprzez kontrolowane dodawanie materiału (18–21).

Proces zazwyczaj rozpoczyna się od stworzenia trójwymiarowego modelu cyfrowego przy użyciu oprogramowania do projektowania wspomaganego komputerowo (CAD) lub wygenerowanego na podstawie danych obrazowania medycznego, takich jak rezonans magnetyczny (MRI) czy tomografia komputerowa (CT). Modele cyfrowe stanowią podstawę procesu wytwarzania (19).

### 2.1 Główne techniki druku 3D

Obecnie w zastosowaniach technicznych i medycznych wykorzystuje się różne technologie produkcji addytywnej:

- **Druk oparty na ekstruzji:** materiał termoplastyczny lub biologiczny jest wyciskany przez dyszę i nakładany warstwa po warstwie.
- **Spiekanie:** materiał proszkowy lub ciekły jest selektywnie łączony przy użyciu źródła wysokiej energii, takiego jak laser.
- **Stereolitografia (SLA):** światło laserowe lub ultrafioletowe utwardza ciekłe żywice, tworząc struktury o wysokiej rozdzielczości.
- **Modelowanie metodą osadzania topionego materiału (FDM):** filament termoplastyczny jest topiony i precyzyjnie nakładany warstwa po warstwie w celu budowy obiektów.

Spośród tych technologii modelowanie metodą osadzania topionego materiału (FDM) jest jedną z najczęściej stosowanych w ochronie zdrowia.

### 2.2 Modelowanie metodą osadzania topionego materiału (FDM): zasady i architektura funkcjonalna (18,20,21)

Modelowanie metodą osadzania topionego materiału (FDM) jest szeroko stosowane w ochronie zdrowia do produkcji modeli anatomicznych, ortez, szyn, przewodnic chirurgicznych oraz symulatorów edukacyjnych. Proces ten opiera się na kontrolowanej ekstruzji filamentu



termoplastycznego, który jest podgrzewany do stanu półpłynnego i nakładany warstwa po warstwie, tworząc trójwymiarowy obiekt na podstawie modelu cyfrowego. Każda nowo nałożona warstwa łączy się termicznie z poprzednią, tworząc spójną strukturę.

Zrozumienie mechanicznej i termicznej architektury systemów FDM ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia dokładności wymiarowej, integralności strukturalnej oraz powtarzalności, szczególnie w zastosowaniach klinicznych.

### 2.2.1 System ekstruzji

System ekstruzji odpowiada za transport, topienie i osadzanie materiału. Ciągły filament termoplastyczny (np. PLA, ABS, PETG, TPU) jest przesuwany przez silnik ekstrudera do termicznie regulowanego hot endu, gdzie ulega stopieniu i jest wypychany przez skalibrowaną dyszę (zazwyczaj o średnicy 0,4 mm).

Średnica dyszy determinuje szerokość ścieżki (rozdzielczość w osiach X–Y), maksymalną wysokość warstwy, stabilność ekstruzji oraz prędkość druku. Aby zapewnić odpowiednią przyczepność między warstwami, wysokość warstwy nie powinna zazwyczaj przekraczać 70–80% średnicy dyszy.

Powszechnie stosowane są dwie konfiguracje mechaniczne:

- **Direct Drive:** silnik jest zamontowany bezpośrednio na głowicy drukującej. Konfiguracja ta zapewnia precyzyjną kontrolę ekstruzji i retrakcji oraz jest szczególnie korzystna w przypadku elastycznych polimerów.
- **Bowden:** silnik jest zamontowany zdalnie, a filament prowadzony jest przez rurkę Bowdena. Rozwiązanie to zmniejsza masę ruchomą i może zwiększyć prędkość druku, jednak wymaga precyzyjnej kalibracji w celu utrzymania stabilności ekstruzji.

### 2.2.2 Kinematyka i precyzja mechaniczna

*Drukarki FDM działają w układzie współrzędnych kartezjańskich (X: ruch boczny, Y: ruch przód–tył, Z: pionowe nakładanie warstw). Silniki krokowe napędzają paski, koła pasowe i śruby pociągowe, pozycjonując głowicę drukującą za pomocą dyskretnych i przyrostowych ruchów. Większość systemów wykorzystuje sterowanie w otwartej pętli, co oznacza, że zadane pozycje są realizowane bez sprzężenia zwrotnego pozycji w czasie rzeczywistym.*

*Nieregularności mechaniczne, takie jak luźne paski lub poślizg kół pasowych, mogą powodować kumulujące się błędy (np. przesunięcia warstw), co wpływa negatywnie na dokładność wymiarową. Jest to szczególnie krytyczne w zastosowaniach klinicznych, takich jak prowadnice*



*chirurgiczne czy interfejsy dostosowane do anatomii pacjenta. Dlatego regularna kalibracja i konserwacja mechaniczna stanowią podstawowe środki kontroli jakości.*

### 2.2.3 Zarządzanie temperaturą

*Tworzywa termoplastyczne rozszerzają się podczas ogrzewania i kurczą podczas chłodzenia. Odpowiednia regulacja temperatury ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia integralności strukturalnej i stabilności wymiarowej.*

*Podgrzewany stół roboczy poprawia przyczepność pierwszej warstwy, zmniejsza gradienty termiczne oraz minimalizuje deformacje (warping). Typowe zakresy temperatur obejmują:*

- **PLA:** około 50–60 °C
- **ABS:** do 100–120 °C

*Systemy aktywnego chłodzenia regulują proces zestalania nakładanych warstw i zapobiegają gromadzeniu się ciepła (heat creep) w hot endzie. Odpowiednia równowaga pomiędzy temperaturą ekstruzji a szybkością chłodzenia optymalizuje przyczepność międzywarstwową, jakość powierzchni oraz stabilność wymiarową.*

## 2.3 Materiały stosowane w technologii FDM i zastosowania medyczne (20)

Dobór materiału jest kluczowym czynnikiem determinującym zarówno właściwości mechaniczne, jak i przydatność kliniczną danego rozwiązania.

- **Kwas polimlekowy (PLA):** wysoce wszechstronny termoplast stosowany nie tylko do standardowego prototypowania, ale również w zastosowaniach medycznych, takich jak prowadnice chirurgiczne, aplikacje w chirurgii ortopedycznej, matryce do regeneracji tkanek oraz powłoki do kontrolowanego uwalniania leków.
- **ABS:** wytrzymały termoplast o zwiększonej odporności na wysokie temperatury.
- **PETG:** zapewnia większą odporność mechaniczną oraz stabilność chemiczną.
- **TPU:** elastyczny polimer odpowiedni do miękkich interfejsów lub komponentów ortotycznych.
- **PVA:** materiał rozpuszczalny w wodzie, powszechnie stosowany do tworzenia złożonych struktur podporowych w druku wielomateriałowym.

Dobór odpowiedniego materiału powinien uwzględniać wymagania mechaniczne, biokompatybilność, odporność strukturalną oraz planowaną funkcję kliniczną.

Podsumowanie głównych cech druku 3D FDM w ochronie zdrowia przedstawiono w **Tabeli I**.



Tabela I. Podsumowanie technologii druku 3D FDM w ochronie zdrowia

Druk 3D FDM w ochronie zdrowia	Podstawowa zasada	Kluczowe komponenty / zmienne	Aspekty techniczne	Znaczenie kliniczne / praktyczne
<b>Podstawy FDM</b>	Produkcja addytywna tworzy obiekty warstwa po warstwie na podstawie modelu cyfrowego	Modele CAD, obrazy MRI/CT, pliki STL	Jakość modelu determinuje końcową dokładność	Umożliwia rozwiązania specyficzne dla pacjenta i personalizację anatomiczną
<b>Techniki druku 3D</b>	Różne metody osadzania energii/materiału	Ekstruzja, spiekanie, SLA, FDM	Rozdzielczość, kompatybilność materiałów, koszt urządzenia	Wybór zależy od wymagań dotyczących precyzji i kontekstu zastosowania
<b>System ekstruzji</b>	Filament termoplastyczny jest topiony i osadzany przez dyszę	Filament (PLA, ABS, PETG, TPU), hot end, dysza (np. 0,4 mm), Direct Drive / Bowden	Średnica dyszy determinuje rozdzielczość i wysokość warstwy ( $\leq 70-80\%$ średnicy dyszy)	Określa integralność strukturalną i przydatność do ortez, prowadnic i symulatorów
<b>Kinematyka i kontrola ruchu</b>	Kontrolowany ruch w układzie współrzędnych kartezjańskich	Osie X–Y–Z, silniki krokowe, paski, śruby pociągowe	Sterowanie w otwartej pętli; niewspółosiowości mechaniczne mogą powodować przesunięcia warstw	Kluczowe dla dokładności wymiarowej prowadnic chirurgicznych i urządzeń personalizowanych
<b>Zarządzanie temperaturą</b>	Kontrolowane ogrzewanie i chłodzenie zapewniają przyczepność warstw	Podgrzewany stół (PLA: 50–60°C; ABS: 100–120°C), wentylatory chłodzące	Równowaga między temperaturą ekstruzji a szybkością chłodzenia	Zapobiega deformacjom ( <i>warping</i> ) i zapewnia stabilność strukturalną
<b>Materiały stosowane w FDM</b>	Właściwości mechaniczne i biologiczne zależą od rodzaju materiału	PLA, ABS, PETG, TPU, PVA (materiały podporowe)	Wytrzymałość, elastyczność, odporność termiczna, usuwanie podpór	Określa zachowanie mechaniczne i potencjalne zastosowanie medyczne
<b>Projektowanie cyfrowe i optymalizacja</b>	Geometria jest tworzona lub modyfikowana przed produkcją	Oprogramowanie CAD, obrazy medyczne, kontrola siatki modelu	Jakość powierzchni i integralność modelu są kluczowe	Zapobiega błędom druku i poprawia precyzję kliniczną
<b>Slicing i generowanie G-Code</b>	Model cyfrowy jest przekształcany w instrukcje dla urządzenia	Plik STL, oprogramowanie slicer (np. Cura), G-Code	Prawidłowy wybór drukarki zapobiega uszkodzeniom mechanicznym	Zapewnia bezpieczne i precyzyjne wykonanie
<b>Parametryzacja</b>	Wewnętrzne i zewnętrzne cechy obiektu są definiowane programowo	Wysokość warstwy, prędkość, gęstość/wzór wypełnienia, grubość ścian	Kompromis między wytrzymałością, czasem druku i jakością powierzchni	Umożliwia dostosowanie wytrzymałości i masy urządzenia
<b>Wykonanie i produkcja</b>	Fizyczna budowa obiektu warstwa po warstwie	Transfer G-Code, przyczepność pierwszej warstwy, skirt	Kalibracja i konserwacja są niezbędne	Określa powtarzalność i niezawodność
<b>Obróbka końcowa</b>	Ostateczne wykończenie wydrukowanego obiektu	Usuwanie podpór, opary acetonu, utwardzanie UV, polerowanie mechaniczne	Techniki wykończeniowe zależne od materiału	Poprawia trwałość, estetykę i funkcjonalność

Training Educational Course on innovative HEALTHcare technologies.  
KA210-VET - Small-scale partnerships in vocational education and training (KA210-VET).  
Project Number: 2024-1-PL01-KA210-VET-000243362



## 2.4 Cyfrowy proces produkcji i workflow druku 3D: od projektu technicznego do zastosowania klinicznego (18,20)

Transformacja cyfrowej koncepcji w fizyczny obiekt o wysokiej dokładności obejmuje uporządkowany proces znany jako produkcja addytywna. Proces ten wymaga płynnej integracji specjalistycznego oprogramowania i sprzętu w celu zapewnienia precyzji, szczególnie w zastosowaniach technicznych i medycznych.

### 2.4.1 Projektowanie cyfrowe i optymalizacja modelu

Proces rozpoczyna się od stworzenia modelu trójwymiarowego. Można to osiągnąć za pomocą oprogramowania do projektowania wspomaganego komputerowo (CAD), pobierania zweryfikowanych plików z internetowych repozytoriów, takich jak Thingiverse, lub wykorzystania inżynierii odwrotnej na podstawie obrazowania medycznego, takiego jak tomografia komputerowa (CT) czy rezonans magnetyczny (MRI). Zastosowanie narzędzi CAD/CAM na tym etapie jest kluczowe, ponieważ umożliwia modyfikację i optymalizację geometrii modelu przed zużyciem jakiegokolwiek materiału. Kontrola jakości jest na tym etapie niezbędna. Modele cyfrowe muszą być sprawdzane pod kątem jakości powierzchni i siatki modelu. Niskiej jakości pliki cyfrowe prowadzą do słabych rezultatów fizycznych podczas drukowania (11,19).

### 2.4.2 Eksport plików i proces slicing

Po zakończeniu projektowania model eksportowany jest jako plik STL. Format ten przekształca powierzchnię modelu w uproszczoną siatkę, usuwając dodatkowe dane, takie jak kolor czy tekstura. Następnie plik STL jest importowany do oprogramowania typu *slicer*, takiego jak Ultimaker Cura lub Orca, które dzieli model na poziome warstwy i generuje kod G-Code. Podczas procesu slicing należy wybrać konkretny model drukarki (np. Creality Ender 5). Użycie kodu G-Code przeznaczonego dla innego urządzenia może prowadzić do poważnych uszkodzeń mechanicznych (22,23).

### 2.4.3 Dobór materiału i konfiguracja sprzętu

Przed rozpoczęciem drukowania operatorzy muszą upewnić się, że wybrano odpowiedni materiał zgodnie z wymaganiami zastosowania, że drukarka została prawidłowo skalibrowana oraz że średnica dyszy skonfigurowana w oprogramowaniu odpowiada rzeczywistemu sprzętowi. Taka zgodność zapewnia stabilność ekstruzji oraz dokładność wymiarową (24).



#### 2.4.4 Parametryzacja techniczna (24)

Wewnętrzne i zewnętrzne właściwości drukowanego obiektu są określane przez kilka kluczowych parametrów:

1. **Wysokość warstwy (rozdzielczość osi Z) oraz prędkość druku:** wpływają na równowagę pomiędzy jakością powierzchni a czasem produkcji.
2. **Gęstość i wzory wypełnienia:** procentowe wypełnienie oraz jego wzór (np. linie dla wydajności lub tri-hexagon dla odporności strukturalnej) determinują wytrzymałość i masę obiektu.
3. **Grubość ścian:** wpływa na odporność na naciski zewnętrzne oraz ogólną trwałość konstrukcji.

#### 2.4.5 Wykonanie i produkcja warstwa po warstwie

Kod G-Code jest przesyłany do drukarki (najczęściej za pomocą karty pamięci), a następnie obiekt jest wytwarzany warstwa po warstwie. Prawidłowa realizacja procesu zależy od regularnej kalibracji i konserwacji urządzenia oraz odpowiedniej przyczepności pierwszej warstwy.

Techniki takie jak drukowanie „Skirt” (obwodowej linii wokół obiektu) pomagają usunąć powietrze z dyszy oraz zapewnić stabilny przepływ materiału przed rozpoczęciem właściwego osadzania.

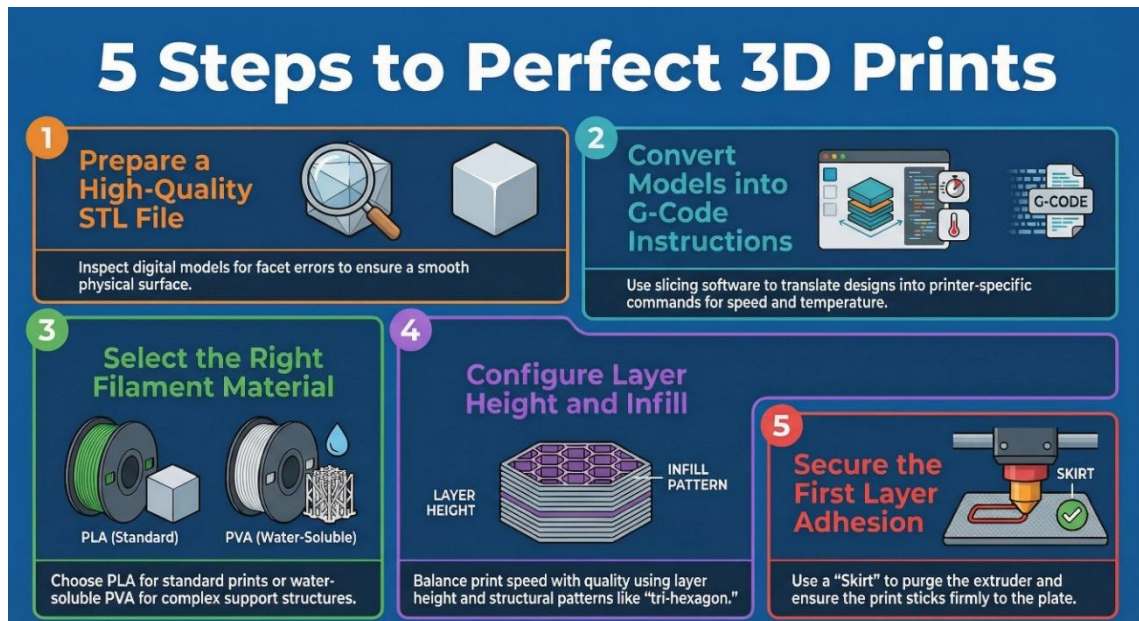
#### 2.4.6 Obróbka końcowa i wykończenie (21)

Ostatni etap obejmuje fizyczne dostosowanie wydruku do wymagań technicznych i klinicznych.

W zależności od zastosowanego materiału i technologii, obróbka końcowa może obejmować:

- **Usuwanie podpór:** ręczne usuwanie tymczasowych struktur podporowych.
- **Wykończenie powierzchni:** zastosowanie oparów acetonu, utwardzania ultrafioletowego lub polerowania mechanicznego w celu poprawy trwałości i jakości estetycznej.

Przestrzeganie tego uporządkowanego procesu technicznego — od projektowania cyfrowego po obróbkę końcową — umożliwia wytwarzanie spersonalizowanych i opłacalnych rozwiązań spełniających wysokie standardy wymagane w zastosowaniach przemysłowych i klinicznych. Odpowiednie zrozumienie podstaw technologicznych, architektury mechanicznej, właściwości materiałów oraz parametrów procesu jest niezbędne do zapewnienia bezpieczeństwa, precyzji i powtarzalności w produkcji addytywnej związanej z ochroną zdrowia.



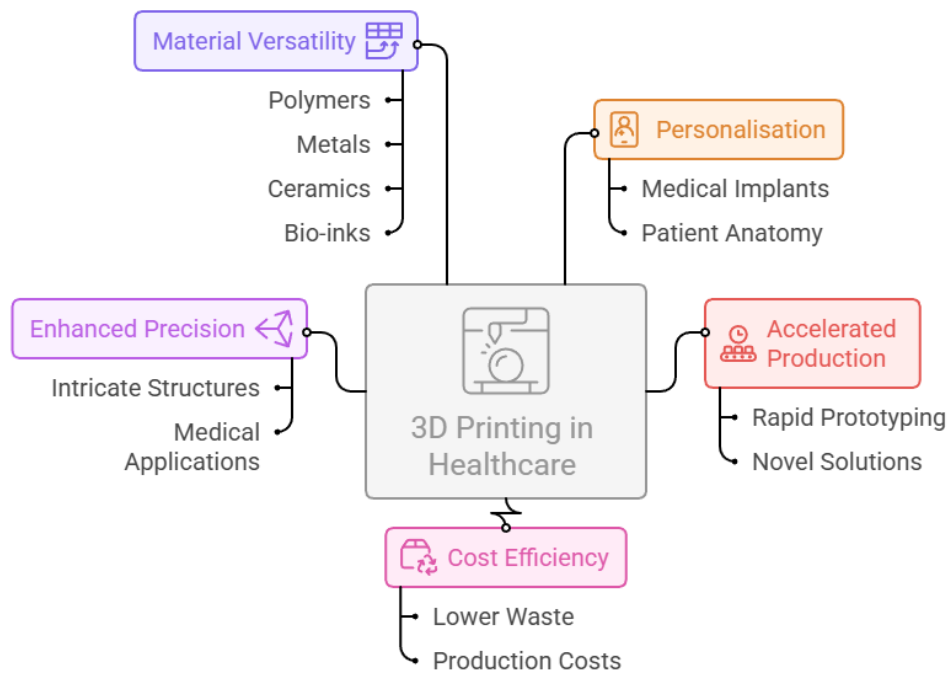
Rysunek 3: 5 kroków do perfekcyjnych wydruków 3D

## 2.5 Główne zalety druku 3D w ochronie zdrowia

- **Personalizacja:** wytwarzanie implantów i urządzeń medycznych dostosowanych do anatomii pacjenta (1,2,5,11,15).
- **Przyspieszona produkcja:** szybkie prototypowanie i skrócenie czasu wprowadzania nowych rozwiązań medycznych na rynek (1,3,5,11,15,16).
- **Efektywność kosztowa:** mniejsze zużycie materiałów oraz niższe koszty produkcji w porównaniu z tradycyjnymi metodami wytwarzania (2,11,14,15).
- **Zwiększona precyzja:** umożliwia tworzenie złożonych struktur o wysokiej dokładności, niezbędnych w zastosowaniach medycznych (1–3).
- **Wszechstronność materiałowa:** kompatybilność z szeroką gamą materiałów, w tym polimerami, metalami, ceramiką i bioatramentami (1,2,11,25).

Porównawczy przegląd technologii druku 3D stosowanych w ochronie zdrowia znajduje się w **Aneksie II**.

## Advantages of 3D Printing in Healthcare



Rysunek 4: Zalety druku 3D w ochronie zdrowia

### 3. Kliniczne zastosowania druku 3D

Integracja technologii druku 3D z ochroną zdrowia znacząco usprawniła praktykę kliniczną, planowanie chirurgiczne, rekonwalescencję pacjentów oraz dostarczanie spersonalizowanych terapii (17,19,26,27). Umożliwiając tworzenie złożonych, konfigurowalnych i opłacalnych rozwiązań medycznych, druk 3D zmienia sposób projektowania i realizacji opieki zdrowotnej w wielu dziedzinach medycyny. Zastosowania obejmują protezy, modele anatomiczne, implanty oraz urządzenia medyczne dostosowane do pacjenta, a także wpływają na takie obszary jak szkolenie medyczne, reagowanie w sytuacjach zagrożenia zdrowia publicznego oraz innowacje farmakologiczne.

#### 3.1 Protezy i ortotyka

Druk 3D umożliwia szybkie i przystępne kosztowo wytwarzanie protez kończyn oraz urządzeń ortotycznych dostosowanych do indywidualnych potrzeb pacjenta. Te spersonalizowane rozwiązania są projektowane zgodnie z anatomią użytkownika, co prowadzi do poprawy mobilności, większego komfortu fizycznego i lepszej funkcjonalności. Zaawansowane materiały, takie jak kompozyty z włókna węglowego i elastomery termoplastyczne, pozwalają tworzyć lekkie, a jednocześnie wytrzymałe komponenty wspierające naturalny ruch.



Wpływ tej technologii jest szczególnie istotny dla pacjentów pediatrycznych, osób po urazach oraz ludzi żyjących w regionach o ograniczonych zasobach, gdzie dostęp do tradycyjnych protez jest często utrudniony. Ponadto estetyczna personalizacja protez pomaga pacjentom budować pewność siebie i wspiera dobrostan emocjonalny. Druk 3D umożliwia również produkcję na żądanie, skracając czas oczekiwania i zwiększając dostępność rozwiązań medycznych (28–30).

### 3.2 Modele anatomiczne i prowadnice chirurgiczne

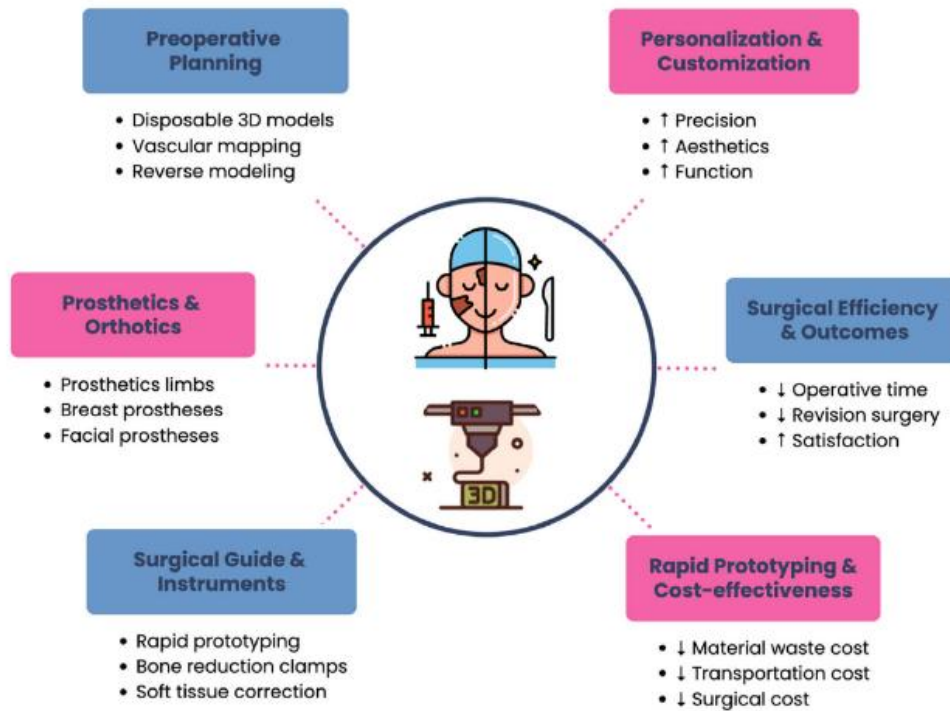
Modele anatomiczne tworzone na podstawie obrazowania o wysokiej rozdzielczości, takiego jak tomografia komputerowa (CT) czy rezonans magnetyczny (MRI), zapewniają klinicystom szczegółowe, dotykowe wizualizacje złożonych struktur anatomicznych. Te modele drukowane w 3D są wykorzystywane do usprawniania planowania przedoperacyjnego, wspomaganie rehabilitacji chirurgicznej oraz poprawy edukacji pacjentów i procesu uzyskiwania świadomej zgody. Chirurgi mogą ćwiczyć procedury na realistycznych replikach, skrócić czas operacji oraz minimalizować ryzyko powikłań (31).

Wykorzystanie urządzeń medycznych drukowanych w 3D w bezpośrednim leczeniu pacjentów znacząco wzrosło od 2015 roku. Najczęstsze zastosowania obejmują druk 3D z materiałów metalowych i niemetalowych w ortopedii oraz ortopedycznej onkologii. Jednocześnie obserwuje się rosnącą tendencję do wykorzystywania niemetalowego druku 3D w medycynie do tworzenia spersonalizowanych i precyzyjnych urządzeń stosowanych w neurochirurgii i onkologii (30).

Prowadnice chirurgiczne dostosowane do indywidualnej anatomii pacjenta dodatkowo zwiększają precyzję zabiegów. Urządzenia te pomagają kierować narzędziami tnącymi oraz pozycjonowaniem implantów z wysoką dokładnością, zmniejszając zmienność procedur i poprawiając wyniki leczenia. Ich zastosowanie obejmuje chirurgię czaszkowo-twarzową, ortopedię, onkologię oraz interwencje sercowo-naczyniowe.

### 3.3 Spersonalizowane implanty

Spersonalizowane implanty drukowane w 3D oferują niezrównane dopasowanie anatomiczne oraz zgodność strukturalną. Są one wytwarzane z materiałów biokompatybilnych, takich jak stopy tytanu, PEEK czy bioresorbowalne polimery. Implanty te są szczególnie cenne w przypadkach, gdy standardowe rozwiązania okazują się niewystarczające, na przykład w złożonych rekonstrukcjach szkieletowych, resekcjach nowotworów czy wadach wrodzonych (4,32).



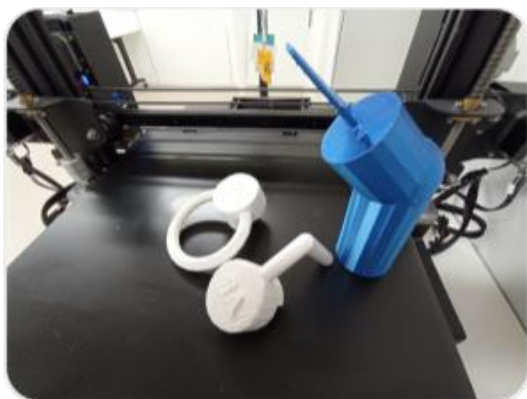
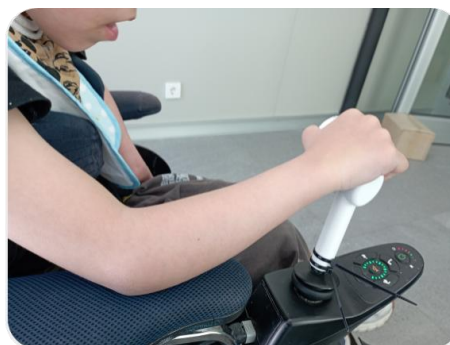
Rysunek 5: Zalety druku 3D w ochronie zdrowia (4).

Możliwość planowania i wytwarzania tych implantów przed operacją przy użyciu oprogramowania CAD pozwala skrócić czas zabiegu, zmniejszyć liczbę powikłań oraz przyspieszyć rekonwalescencję. Chirurdzy coraz częściej korzystają z tego podejścia w celu zapewnienia spersonalizowanej opieki, co poprawia zarówno wyniki funkcjonalne, jak i estetyczne.

### 3.4 Spersonalizowane urządzenia medyczne

Wszelchonność druku 3D wspiera produkcję szerokiej gamy spersonalizowanych urządzeń medycznych. Przykłady obejmują ergonomiczne narzędzia chirurgiczne, ortozy ortopedyczne, noszone monitory zdrowia, aparaty słuchowe, urządzenia stomatologiczne oraz implanty do dostarczania leków. Urządzenia te są projektowane nie tylko tak, aby odpowiadały anatomii pacjenta, lecz także aby integrowały się z określonymi procedurami klinicznymi (11).

Ta elastyczność umożliwia iteracyjne udoskonalanie produktów na podstawie informacji zwrotnej uzyskiwanej w czasie rzeczywistym w praktyce klinicznej. Poprawia również przestrzeganie zaleceń terapeutycznych przez pacjentów dzięki zwiększeniu komfortu, funkcjonalności i skuteczności urządzeń. W rehabilitacji pooperacyjnej oraz w opiece nad pacjentami przewlekle chorymi takie spersonalizowane rozwiązania mogą mieć charakter transformacyjny.



Rysunek 6: Urządzenia wspomagające wykonane w [SOUL Fab Lab, FSJD, Madryt](#).

### 3.5 Optyczalna i zdecentralizowana produkcja

Druk 3D wspiera szybką, lokalną produkcję niewielkich lub jednorazowych wyrobów medycznych. Jest to szczególnie korzystne w sytuacjach, gdy tradycyjne łańcuchy dostaw są zakłócone lub niewystarczające, na przykład podczas globalnych kryzysów zdrowotnych. W trakcie pandemii COVID-19 druk 3D był szeroko wykorzystywany do produkcji wymazówek donosowych oraz komponentów respiratorów, co potwierdziło jego znaczenie dla odporności systemów zdrowia publicznego.

Możliwość decentralizacji produkcji zmniejsza koszty transportu, skraca czas dostawy oraz wspiera systemy magazynowania typu *just-in-time* w placówkach ochrony zdrowia. Taka decentralizacja może również sprzyjać innowacjom w regionach wiejskich lub słabiej rozwiniętych, umożliwiając wytwarzanie rozwiązań bezpośrednio w miejscu opieki nad pacjentem (*point-of-care fabrication*) (8,14,33,34).



Podsumowując, poza głównymi obszarami zastosowań, wpływ druku 3D rozszerzył się na wiele dodatkowych specjalizacji medycznych, w tym okulistykę, gdzie umożliwia wytwarzanie spersonalizowanych soczewek wewnątrzgałkowych i rusztowań rogówkowych; laryngologię (otorynolaryngologię), poprzez druk modeli zatok, implantów słuchowych i szyn dróg oddechowych; chirurgię naczyniową, dzięki opracowywaniu spersonalizowanych stentów, protez naczyniowych oraz modeli anatomicznych do planowania naprawy tętniaków; stomatologię, poprzez produkcję koron, mostów, protez dentystycznych, przewodnic chirurgicznych i nakładek ortodontycznych; onkologię, dzięki projektowaniu osłon radiacyjnych i przewodnic chirurgicznych dostosowanych do pacjenta; oraz pediatrię, gdzie wspiera tworzenie regulowanych protez, modeli dróg oddechowych i dostosowanych materiałów edukacyjnych. Ta różnorodność podkreśla przekrojową i coraz bardziej zintegrowaną rolę druku 3D we współczesnej praktyce medycznej (33).

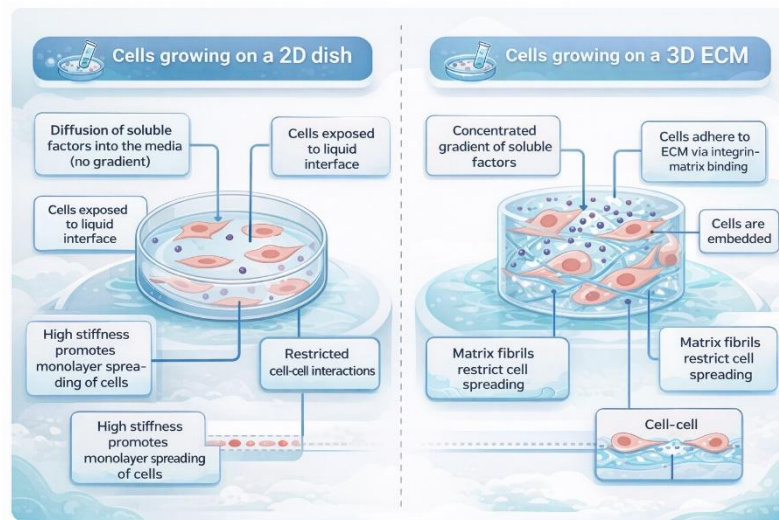
#### **4. Innowacje i przyszłe trendy: biodruk i medycyna regeneracyjna**

Wraz z dalszym rozwojem druku 3D technologia ta coraz częściej wkracza w obszary biologiczne i komórkowe. Biodruk stanowi połączenie produkcji addytywnej z medycyną regeneracyjną, wykorzystując bioatramenty składające się z komórek, czynników wzrostu i bio materiałów do tworzenia funkcjonalnych żywych tkanek, a potencjalnie w przyszłości nawet całych narządów.

##### **4.1 Inżynieria tkanek i narządów**

Biodruk umożliwia tworzenie żywych tkanek, takich jak warstwy skóry, chrząstka, kość, implanty rogówki oraz przewody naczyniowe. Tkanki te znajdują zastosowanie zarówno w badaniach naukowych, jak i w praktyce klinicznej, oferując alternatywę dla przeszczepów od dawców oraz syntetycznych zamienników. Naukowcy pracują również nad drukowaniem elementów narządów, w tym zrazików wątroby, kanalików nerkowych oraz łątek sercowych (2).

Wykorzystanie komórek macierzystych pochodzących od pacjenta w procesie biodruku może zminimalizować ryzyko odrzutu immunologicznego. Tego rodzaju postępy mogą w przyszłości wyeliminować listy oczekujących na przeszczepy narządów, umożliwiając autologiczne zastępowanie narządów.

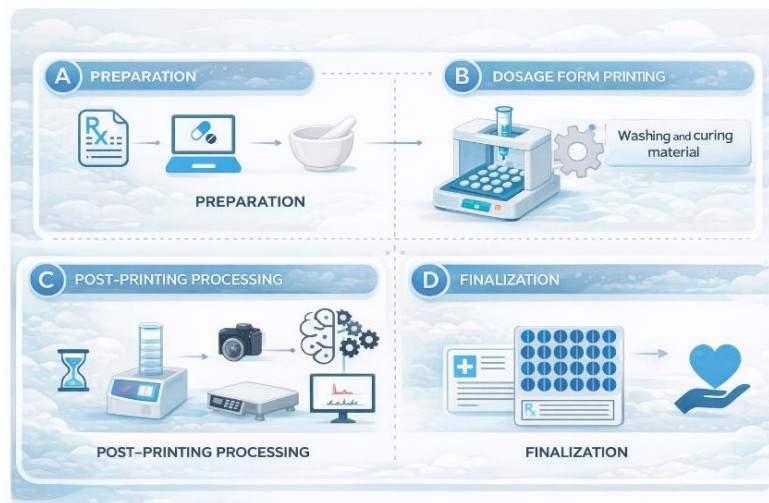


Rysunek 7: Zalety druku 3D w ochronie zdrowia (2).

#### 4.2 Modelowanie chorób i testowanie leków

Platformy tkankowe tworzone za pomocą biodruku 3D symulują złożone mikrośrodowisko chorób, takich jak nowotwory, choroba Alzheimera czy schorzenia włóknieniowe. Platformy te służą jako modele do badania mechanizmów chorobowych oraz do testowania leków w warunkach zbliżonych do fizjologicznych.

Wykorzystując linie komórkowe specyficzne dla pacjenta, systemy biodruku wspierają również farmakologię spersonalizowaną poprzez ocenę, w jaki sposób poszczególni pacjenci mogą reagować na różne terapie. Podejście to usprawnia proces opracowywania leków oraz zmniejsza zależność od badań na zwierzętach (35).



Rysunek 8: Proces farmakologii spersonalizowanej (35).



#### 4.3 Medycyna regeneracyjna i inżynieria rusztowań

Inżynieria rusztowań z wykorzystaniem druku 3D umożliwia precyzyjną organizację przestrzenną komórek i biomateriałów w celu regeneracji uszkodzonych lub chorobowo zmienionych tkanek. Rusztowania te są często wzbogacane czynnikami wzrostu lub białkami macierzy zewnątrzkomórkowej (ECM), które wspierają adhezję i proliferację komórek. Zastosowania obejmują regenerację układu mięśniowo-szkieletowego, odtwarzanie skóry po oparzeniach, rekonstrukcję tkanki sercowej oraz inżynierię tkanki nerwowej. Rusztowania mogą być projektowane tak, aby ulegały degradacji równolegle z regeneracją tkanki, eliminując potrzebę przeprowadzania dodatkowych zabiegów chirurgicznych (36,37).

#### 4.4 Inteligentne terapie i mikrorobotyka

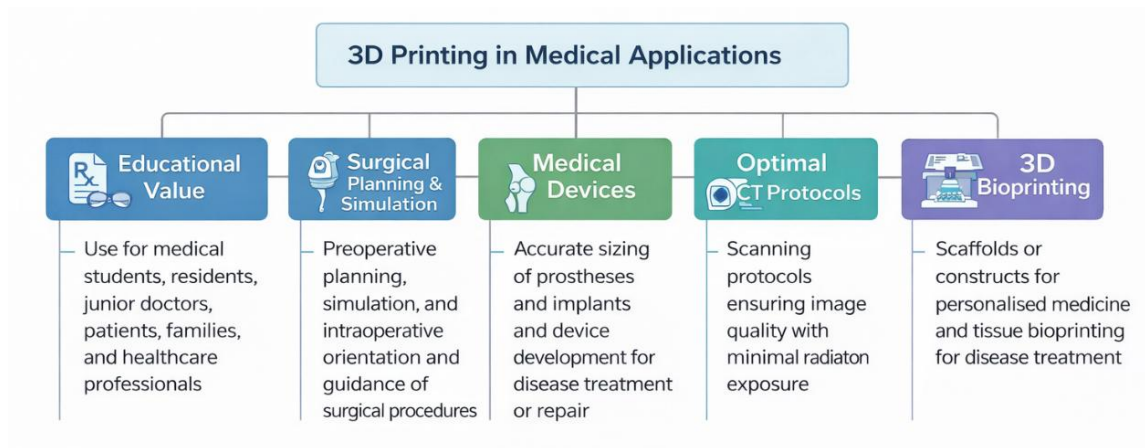
Najnowocześniejsze badania łączą druk 3D z czujnikami, siłownikami i modułami komunikacji bezprzewodowej w celu tworzenia inteligentnych urządzeń terapeutycznych. Obejmują one inteligentne implanty ortopedyczne monitorujące obciążenia mechaniczne, biosensory wykrywające infekcje oraz neurostymulatory stosowane w leczeniu bólu i drżeń.

Równolegle rozwój mikroskalowych urządzeń robotycznych, takich jak „mikro pływacy” (*micro swimmers*), otwiera nowe możliwości precyzyjnie ukierunkowanych interwencji, w tym miejscowego dostarczania leków, usuwania skrzepów oraz małoinwazyjnej diagnostyki (38,39).

Innowacje te wpisują się w szerszy kierunek rozwoju medycyny predykcyjnej, prewencyjnej i spersonalizowanej, wspierając tworzenie terapii lepiej dostosowanych do indywidualnych danych fizjologicznych pacjentów.

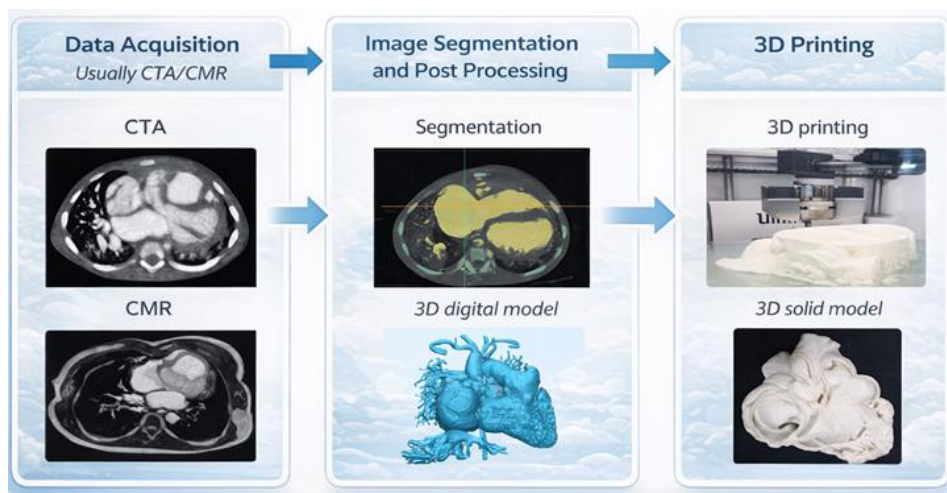
### 5. Implikacje edukacyjne i szkoleniowe

Druk 3D stał się przełomowym narzędziem w edukacji medycznej. Drukowane modele anatomiczne zapewniają studentom dotykowe repliki w skali 1:1, umożliwiające poznawanie anatomii człowieka oraz ćwiczenie technik chirurgicznych. Modele te pozwalają przezwyciężyć ograniczenia związane z dostępnością preparatów anatomicznych, kosztami oraz kwestiami etycznymi (7,40).



Rysunek 9: Implikacje edukacyjne i szkoleniowe (7).

Symulowane modele patologiczne umożliwiają osobom szkolącym się ćwiczenie procedur w rzadkich lub złożonych warunkach klinicznych. Instytucje edukacyjne integrują druk 3D z laboratoriami symulacyjnymi oraz programami nauczania, oferując uczestnikom środowisko o niskim ryzyku do rozwijania umiejętności technicznych i kompetencji decyzyjnych. Ponadto drukowane narzędzia wspierają kształcenie międzyzawodowe oraz sprzyjają współpracy w realistycznych scenariuszach klinicznych (7).



Rysunek 10: Implikacje edukacyjne i szkoleniowe (7).

Przyszłość edukacji w ochronie zdrowia opiera się na środowiskach uczenia się bazujących na doświadczeniu i wspieranych technologią; druk 3D znajduje się w centrum tej transformacji.

## 6. Wyzwania, aspekty strategiczne i przyszłość druku 3D w medycynie

Chociaż druk 3D zmienia krajobraz ochrony zdrowia poprzez dostarczanie innowacyjnych rozwiązań zwiększających precyzję kliniczną, poprawiających opiekę nad pacjentem i ograniczających ryzyko procedur medycznych (1,2,5,6,11,14–16,19,21,25), jego bezpieczna i zrównoważona integracja z codzienną praktyką wymaga szczególnej uwagi wobec szeregu kluczowych wyzwań.

- **Zgodność z regulacjami** pozostaje kluczowa i wymaga rygorystycznych standardów jakości oraz jasno określonych ścieżek zatwierdzania produktów medycznych drukowanych w 3D w celu zapewnienia bezpieczeństwa pacjentów (1,6,7,11,15,41).
- **Kwestie etyczne** również muszą zostać uwzględnione, szczególnie w zakresie przejrzystości zastosowań specyficznych dla pacjenta oraz solidnych protokołów bezpieczeństwa danych (42,43).
- **Z perspektywy środowiskowej** zrównoważony rozwój wymaga oceny zużycia materiałów, energii oraz produkcji odpadów w celu minimalizacji wpływu ekologicznego (44).
- **Dostępność ekonomiczna** nadal stanowi barierę, ponieważ systemy druku o wysokiej precyzji oraz certyfikowane materiały biokompatybilne mogą ograniczać szerokie wdrażanie tej technologii (17,45). Ponadto skalowalność produkcji będzie kluczowa dla zaspokojenia rosnącego zapotrzebowania klinicznego i szerszego wdrożenia w systemach ochrony zdrowia.

Aby w pełni wykorzystać transformacyjny potencjał druku 3D, pracownicy ochrony zdrowia powinni:

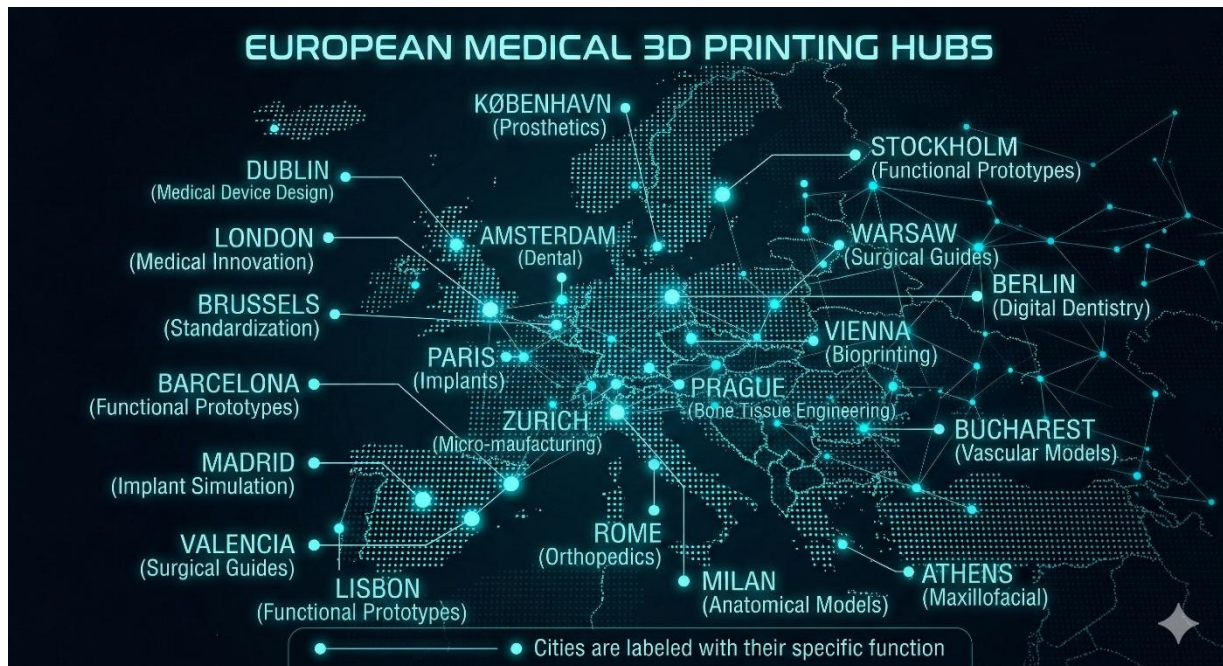
- rozwijać pogłębioną wiedzę specjalistyczną dotyczącą jego zastosowań klinicznych;
- angażować się we współpracę interdyscyplinarną z inżynierami, specjalistami materiałowymi i ekspertami ds. regulacji w celu wspierania odpowiedzialnych innowacji;
- wspierać rygorystyczne inicjatywy badawcze wzmacniające podstawy naukowe oraz promować edukację i świadomość poprzez ustrukturyzowane programy szkoleniowe dla obecnych i przyszłych specjalistów.

W miarę dalszego rozwoju tej dziedziny uwzględnianie aspektów regulacyjnych, etycznych, ekonomicznych i środowiskowych będzie kluczowe dla zapewnienia, że druk 3D spełni swoją obietnicę dostarczania spersonalizowanych terapii, poprawy wyników klinicznych oraz prawdziwie skoncentrowanej na pacjencie opieki zdrowotnej.



Rysunek 11: Modele wykonane w SOUL Fab Lab, FSJD, Madryt.

## 7. Mapowanie europejskich hubów innowacji zdrowotnych



Krajobraz innowacji w ochronie zdrowia w Europie przechodzi obecnie transformację strukturalną, napędzaną konwergencją produkcji addytywnej, technologii cyfrowych bliźniaków (*digital twins*) oraz robotycznych systemów wspomagających. Przejście od standaryzowanych, masowo produkowanych urządzeń medycznych do interwencji dostosowanych do konkretnego pacjenta jest wspierane przez rozproszoną sieć centrów doskonałości, które łączą inżynierię akademicką z praktyką kliniczną. W Unii Europejskiej ramy regulacyjne — w szczególności rozporządzenie dotyczące wyrobów medycznych (MDR 2017/745) — na nowo zdefiniowały zasady produkcji typu „point-of-care” (POC), umożliwiając szpitalom przejście od roli biernych odbiorców technologii do aktywnych projektantów i producentów spersonalizowanych rozwiązań klinicznych.

### 7.1 Strategiczna architektura biomodelowania 3D i biodruku medycznego

Rozwój biomodeli 3D stanowi jeden z głównych elementów integracji technologicznej w środowisku szpitalnym. Dzięki przekształcaniu złożonych danych radiologicznych w fizyczne lub wysokiej jakości wirtualne reprezentacje, zespoły kliniczne mogą znacząco usprawnić planowanie przedoperacyjne, zwiększyć precyzję śródoperacyjną oraz poprawić komunikację z pacjentem.

### 7.1.1 Ekosystem kataloński: Barcelona jako światowy lider innowacji 3D w pediatrii

Barcelona ugruntowała swoją pozycję jako jedno z najważniejszych światowych centrów zastosowań technologii 3D w pediatrii, głównie dzięki działalności [Szpitala Dziecięcego SJD Barcelona](#) oraz Szpitala Uniwersyteckiego Vall d'Hebron. Jednostka 3D w SJD Barcelona, znana jako 3DForHealth (3D4H), stanowi przykład multidyscyplinarnego charakteru współczesnej inżynierii medycznej. Formalnie utworzona w 2016 roku, lecz działająca już od 2013 roku, jednostka integruje radiologów, chirurgów oraz inżynierów innowacji, wspierając ponad 500 projektów rocznie.



Obraz: Edukacja anatomiczna (40)

Kluczowym elementem modelu SJD jest integracja jednostki 3D bezpośrednio z klinicznym procesem pracy szpitala. Takie podejście typu „point-of-care” umożliwia współpracę w czasie rzeczywistym pomiędzy zespołem chirurgicznym a personelem inżynieryjnym. Na przykład w złożonych przypadkach onkologicznych, takich jak neuroblastoma, chirurdzy wykorzystują modele guzów i otaczających struktur naczyniowych drukowane w 3D w rzeczywistej skali do ćwiczenia procesu resekcji oraz identyfikowania potencjalnych powikłań jeszcze przed wejściem pacjenta na salę operacyjną. Praktyka ta przyczyniła się do skrócenia czasu operacji o ponad 50% w niektórych złożonych procedurach, zmniejszając tym samym czas trwania znieczulenia oraz ryzyko infekcji pooperacyjnych.

Zgodność regulacyjna barcelońskiego hubu stanowi istotny wskaźnik jego dojrzałości. SJD było jednym z pierwszych ośrodków w Europie, które uzyskały certyfikację EU MDR do produkcji spersonalizowanych wyrobów medycznych, zgodnie z systemem zarządzania jakością ISO 13485:2016. Certyfikacja ta gwarantuje, że prowadnice chirurgiczne i implanty drukowane w 3D spełniają takie same standardy bezpieczeństwa jak produkty wytwarzane przez przemysłowych producentów na dużą skalę.

Laboratorium I3PT Parc Taulí 3D Lab w Sabadell stanowi kolejny filar katalońskiego ekosystemu. Początkowo skoncentrowane na traumatologii ortopedycznej, laboratorium rozwinęło się w multidyscyplinarne centrum stanowiące punkt styku medycyny i inżynierii. Współpracuje ono z zewnętrznymi małymi i średnimi przedsiębiorstwami, takimi jak Tailor Surgery, w celu



dostarczania implantów oraz przewodnic chirurgicznych dostosowanych do indywidualnych potrzeb pacjentów, skutecznie łącząc badania szpitalne z produkcją przemysłową.

Center	Focus Area	Technology Implementation	Regulatory Standing
<b>SJD Barcelona Children's Hospital</b>	Pediatrics, Oncology, Orthopedics	FDM, SLA, MJ, Virtual Reality	EU MDR 2017/745, ISO 13485
<b>Vall d'Hebron University Hospital</b>	Multi-specialty, Trauma	Mixed (In-house and Outsourced)	Hospital QMS Art. 5(5) Compliant
<b>I3PT Parc Taulí 3D Lab</b>	Orthopedic Trauma, Maxillofacial	FDM, SLA, MJ, Metal Printing	Manufacturer License EU MDR

### 7.1.2 Korytarz ochrony zdrowia w Madrycie: zaawansowane badania i jednostki szpitali publicznych

Ekosystem madrycki charakteryzuje się dużą koncentracją jednostek 3D działających w szpitalach publicznych, które są silnie zintegrowane z krajową siecią badawczą. Jednostka UPAM3D w [Hospital General Universitario Gregorio Marañón](#) oraz Laboratorium Zarządzania 3D w Hospital Universitario La Paz stanowią czołowe przykłady tego rozwoju.

Jednostka Gregorio Marañón, utworzona w 2015 roku, funkcjonuje jako szpitalny hub dla szerokiego zakresu specjalizacji, ze szczególnym naciskiem na traumatologię ortopedyczną. Wykorzystuje różnorodne technologie, w tym modelowanie metodą osadzania topionego materiału (FDM), stereolitografię (SLA) oraz technologię spiekania w złożu proszkowym (PBF), a także możliwości druku metali do tworzenia trwałych implantów tytanowych. Ośrodek ten odegrał kluczową rolę w wykazaniu opłacalności druku 3D realizowanego w szpitalach, pokazując, że skrócenie czasu operacji i poprawa wyników leczenia mogą zrekompensować początkowe inwestycje w sprzęt drukujący i personel.

Hospital Universitario La Paz, za pośrednictwem swojego instytutu badawczego IdiPAZ, prowadzi Laboratorium Zarządzania 3D założone w 2021 roku. Jego działalność obejmuje tworzenie spersonalizowanych ortez dla dzieci z zaburzeniami mobilności oraz opracowywanie prototypów nowych urządzeń medycznych. Jednostki te należą również do Platformy Biobanków i Biomodeli Instytutu Zdrowia Carlosa III (ISCIII), ogólnokrajowej sieci umożliwiającej wymianę biomodeli i usług biodruku pomiędzy 15 jednostkami na terenie Hiszpanii.



## 7.2 Chirurgia precyzyjna i rozwój prowadnic chirurgicznych

Prowadnice chirurgiczne stanowią jedno z najbardziej praktycznych i bezpośrednich zastosowań technologii 3D na salach operacyjnych. Te dostosowane do pacjenta szablony umożliwiają chirurgom realizację planów przedoperacyjnych z dokładnością submilimetrową, szczególnie w złożonych przypadkach urazowych i rekonstrukcyjnych.

### 7.2.1 *Projekt Trauma3D: współpraca międzyszpitalna Sewilli i Kadyksu*

Południowy region Hiszpanii, a dokładniej obszar pomiędzy Sewillą a Kadyksem, opracował wyspecjalizowany model leczenia urazów ortopedycznych w ramach projektu „Hospital 3D”. Inicjatywa ta jest efektem współpracy Uniwersytetu w Kadyksie (UCA), Hospital Universitario Puerta del Mar w Kadyksie oraz Hospital Universitario Virgen del Rocío w Sewilli.

Szpital Puerta del Mar w Kadyksie utworzył dedykowane laboratorium 3D, które produkuje repliki narządów i złamań kostnych. Umożliwia to przeprowadzenie „suchej próby” operacji, pozwalając zespołowi klinicznemu na wybór i wstępne dopasowanie płytek osteosyntezy jeszcze przed wejściem pacjenta na salę operacyjną. Międzyszpitalny charakter tej współpracy zapewnia bezpośredni dostęp klinicyście z różnych szpitali publicznych do wyspecjalizowanych zasobów inżynierskich na poziomie uniwersyteckim, tworząc wspólną bazę wiedzy i optymalizując wykorzystanie zasobów.

### 7.2.2 *IRCAD i integracja sztucznej inteligencji oraz rzeczywistości rozszerzonej*

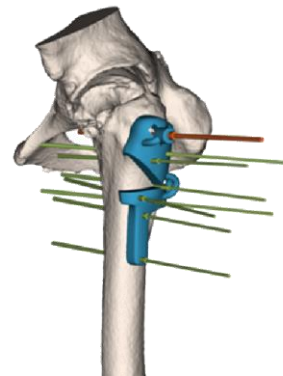
We Francji Instytut Badań nad Rakiem Układu Pokarmowego (IRCAD) zdefiniował na nowo rolę modelowania 3D dzięki działowi Surgical Data Science (SDS). Pod kierownictwem dr. Alexandre’a Hostettlera zespół SDS opracowuje systemy oprogramowania oparte na sztucznej inteligencji, które umożliwiają „transparentną” wizualizację anatomii pacjenta podczas operacji.

Badania IRCAD koncentrują się na nakładaniu obrazów medycznych 3D (tomografii komputerowej lub rezonansu magnetycznego) na obraz wideo z laparoskopii w czasie rzeczywistym — technice znanej jako chirurgia z wykorzystaniem rzeczywistości rozszerzonej (AR). Umożliwia to chirurgom obserwowanie struktur wewnętrznych, takich jak głęboko położone guzy czy ukryte naczynia krwionośne, w czasie rzeczywistym. Aby wspierać te badania, IRCAD opracował „Sight” (*surgical image guidance and healthcare toolkit*), otwartoźródłowy framework w języku C++ zaprojektowany w celu ułatwienia tworzenia oprogramowania do obrazowania medycznego.

Software Component	Functionality	Primary Application
<b>Sight Framework</b>	Modular medical imaging toolkit	Navigation systems, planning software
<b>SightViewer</b>	2D/3D medical image viewer	Diagnostic review of DICOM/VTK data
<b>SightCalibrator</b>	Camera calibration tool	AR synchronization for mono/stereo cameras

### 7.3 Zastosowania stomatologiczne i szczękowo-twarzowe: UMCG i 2INGIS

Dziedzina implantologii stomatologicznej szybko wdrożyła prowadnice chirurgiczne drukowane w 3D. W University Medical Centre Groningen (UMCG) w Holandii badania koncentrowały się na porównaniu cyfrowych i konwencjonalnych metod wytwarzania prowadnic chirurgicznych. Wyniki wykazały, że metody cyfrowe znacząco poprawiają skuteczność pozycjonowania prowadnic chirurgicznych, szczególnie w przypadku mniej doświadczonych specjalistów.



Obraz: [Prowadnice cięcia drukowane w 3D](#) (orthopaedics)

### 7.4 Robotyka rehabilitacyjna: interfejs między uczelnią a inżynierią

Rozwój robotycznych egzoszkieleatów oraz systemów neurorehabilitacyjnych stanowi jeden z najbardziej złożonych obszarów innowacji medycznych, wymagający płynnej integracji inżynierii mechanicznej, technologii sensorów oraz neuronauki.

#### 7.4.1 Hub w Alicante: UMH i Uniwersytet w Alicante

Prowincja Alicante w Hiszpanii stała się jednym z głównych centrów robotyki rehabilitacyjnej, charakteryzującym się silnym „interfejsem uczelnia–inżynieria”. Badacze z Uniwersytetu Miguela Hernández (UMH) w Elche oraz [Uniwersytetu w Alicante \(AU\)](#) znajdują się w czołówce tych badań.

Laboratorium Brain-Machine Interface Systems Lab na UMH, kierowane przez wyspecjalizowanych badaczy, takich jak dr Marisol Rodríguez-Ugarte, koncentruje się na sterowaniu egzoszkieleatami kończyn dolnych z wykorzystaniem wyobrażeń ruchowych (*motor imagery – MI*) oraz sygnałów elektroencefalograficznych (EEG). Badania obejmują zastosowanie

algorytmów głębokiego uczenia do dekodowania zamiaru użytkownika dotyczącego rozpoczęcia chodzenia lub zmiany prędkości, umożliwiając bardziej naturalne i intuicyjne sterowanie asystentami robotycznymi.

<b>Research Topic</b>	<b>Institution</b>	<b>Key Finding/Focus</b>
<b>Brain-Machine Interfaces (BMI)</b>	UMH Elche	Deep learning for exoskeleton gait control
<b>Transcranial Stimulation (tDCS)</b>	UMH Elche	Boosting accuracy of intention detection
<b>Myoelectric Control</b>	Univ. of Alicante	Low-cost non-intrusive gesture recognition
<b>Neurorehabilitation Centers</b>	NeuroVital (Alicante)	Clinical implementation of robotic gait training

Na Uniwersytecie w Alicante grupa Robotics and Vision (założona w 1996 roku) koncentruje się na neurorobotyce oraz sterowaniu mioelektrycznym. Obejmuje to rozwój systemów sensorowych wykorzystujących sygnały elektromiograficzne (EMG) do sterowania protezami dłoni lub ramionami robotycznymi. Te działania akademickie znajdują zastosowanie kliniczne w ośrodkach takich jak NeuroVital — centrum technologiczne zlokalizowane w Parku Naukowym UMH, wyposażone w robotyczne egzoszkielety oraz środowiska rzeczywistości wirtualnej przeznaczone do rehabilitacji pacjentów z uszkodzeniami neurologicznymi.



Obraz: [Dłoń drukowana w 3D \(youbionic\)](#)

#### 7.4.2 Egzoszkielety do rehabilitacji pediatrycznej i urazów rdzenia kręgowego: Marsi Bionics i ABLE

Komercyjne i kliniczne zastosowania egzoszkieleatów w Hiszpanii są dodatkowo wspierane przez firmy takie jak Marsi Bionics i ABLE Human Motion. Marsi Bionics, małe i średnie przedsiębiorstwo z siedzibą w Madrycie, opracowało „EXPLORER” — pierwszy na świecie pediatryczny egzoszkieleat przeznaczony dla dzieci z rdzeniowym zanikiem mięśni oraz mózgowym porażeniem dziecięcym. Urządzenie to wyróżnia się zdolnością do dostosowywania do dzieci już od drugiego roku życia, zapewniając im możliwość pionowej mobilności w kluczowym okresie rozwoju.



#### *7.4.3 Uniwersytet w Aalborgu: interdyscyplinarna robotyka rehabilitacyjna*

W Danii Uniwersytet w Aalborgu prowadzi Center for Rehabilitation Robotics – interdyscyplinarne centrum łączące badaczy z zakresu nauk o zdrowiu, technologii materiałowych oraz systemów elektronicznych. Działalność centrum charakteryzuje się aktywnym udziałem użytkowników końcowych w procesie projektowania, co zapewnia praktyczność rozwiązań robotycznych zarówno w terapii klinicznej, jak i w zastosowaniach domowych.

Jednym z flagowych projektów centrum jest opracowanie lekkiego inteligentnego egzoszkieletu ramienia opartego na systemie ściągien. Urządzenie to wykorzystuje hybrydowy system sterowania, który może być dostosowany od sygnałów mioelektrycznych po sterowanie językiem, a nawet pełne interfejsy mózg–komputer, w zależności od stopnia niepełnosprawności pacjenta.

Centrum utrzymuje rozbudowaną sieć współpracy obejmującą m.in. Duńskie Centrum Rehabilitacji Chorób Nerwowo-Mięśniowych oraz partnerów przemysłowych, takich jak Life Science Robotics i Assistive Innovations.

#### **7.5 Ortoprotetyka: produkcja przemysłowa i lokalne centra wytwarzania**

Sektor ortoprotetyczny w Europie stanowi połączenie wielkoskalowej produkcji przemysłowej oraz wyspecjalizowanych lokalnych warsztatów oferujących indywidualne dopasowanie i wytwarzanie urządzeń.

##### *7.5.1 Globalni liderzy przemysłowi: Ottobock, Proteor i Blatchford*

Niemcy i Francja są siedzibą największych producentów komponentów protetycznych i ortotycznych. [Ottobock](#) (Niemcy) oraz Proteor (Francja) dominują na rynku dzięki szeroko zakrojonym inwestycjom w badania i rozwój oraz globalnym sieciom dystrybucji.

Proteor utrzymuje między innymi centralny zakład produkcyjny w Burgundii we Francji, zdolny do wytwarzania 22 000 spersonalizowanych produktów rocznie. Jednostka badawczo-rozwojowa firmy, zatrudniająca ponad 20 inżynierów i lekarzy, współpracuje z 24 szpitalami uniwersyteckimi w celu testowania i udoskonalania nowych projektów. Taka skala działalności jest niezbędna do produkcji komponentów, takich jak kolana sterowane mikroprocesorowo oraz wysokowydajne stopy z włókna węglowego.



<b>Manufacturer</b>	<b>Headquarters</b>	<b>Key Technologies</b>	<b>Manufacturing Capabilities</b>
<b>Ottobock</b>	Germany	Microprocessor knees, myoelectric hands	Global distribution, digital workflows
<b>Proteor</b>	France	Custom spinal orthoses, CAD-CAM	22k items/year, 24 university partnerships
<b>Blatchford</b>	Germany/UK	Biomimetic ankles, high-end prosthetics	Central manufacturing in Raunheim/Basingstoke
<b>Ortho Europe</b>	UK	Bespoke devices, modular components	Seven production facilities across EU

Blatchford, którego europejska siedziba znajduje się w Raunheim w Niemczech, koncentruje się na projektowaniu biomimetycznym, mającym na celu odwzorowanie naturalnego ruchu ludzkiej kostki i stopy. Te duże przedsiębiorstwa coraz częściej wdrażają cyfrowe procesy pracy oraz wykorzystują skanowanie 3D i oprogramowanie CAD do projektowania lejów protetycznych i ortez, które są następnie wytwarzane za pomocą frezowania CNC lub druku 3D.



Obraz: [Ortezy drukowane w 3D \(Formlabs\)](#)



## 8. Bibliografia

1. Baig MA, Norah A, Haifa A, Nouf A, Baig SM. Implementation of 3D Printing in Various Healthcare Settings: A Scoping Review. *Stud Health Technol Inform.* 2023 Jun 29;305:410–3. doi:10.3233/SHTI230518 PubMed PMID: 37387052.
2. Alzoubi L, Aljabali A, Tambuwala M. Empowering Precision Medicine: The Impact of 3D Printing on Personalized Therapeutic. *AAPS PharmSciTech.* 2023 Nov 14;24. doi:10.1208/s12249-023-02682-w
3. Li H, Fan W, Zhu X. Three-dimensional printing: The potential technology widely used in medical fields. *J Biomed Mater Res A.* 2020 Nov 1;108(11):2217–29. doi:10.1002/jbm.a.36979 PubMed PMID: 32363725.
4. Zahid MJ, Mavani P, Awuah WA, Alabdulrahman M, Pudukollu R, Kundu A, et al. Sculpting the future: A narrative review of 3D printing in plastic surgery and prosthetic devices. *Health Sci Rep.* 2024 Jun;7(6):e2205. doi:10.1002/hsr2.2205 PubMed PMID: 38915353; PubMed Central PMCID: PMC11194296.
5. Bücking TM, Hill ER, Robertson JL, Maneas E, Plumb AA, Nikitichev DI. From medical imaging data to 3D printed anatomical models. *PLOS ONE.* 2017 May 31;12(5):e0178540. doi:10.1371/journal.pone.0178540
6. Choi JW, Kim N. Clinical application of three-dimensional printing technology in craniofacial plastic surgery. *Arch Plast Surg.* 2015 May;42(3):267–77. doi:10.5999/aps.2015.42.3.267 PubMed PMID: 26015880; PubMed Central PMCID: PMC4439584.
7. Sun Z, Wong Y, Yeong C. Patient-Specific 3D-Printed Low-Cost Models in Medical Education and Clinical Practice. *Micromachines.* 2023 Feb 1;14. doi:10.3390/mi14020464
8. Crafts TD, Ellsperman SE, Wannemuehler TJ, Bellicchi TD, Shipchandler TZ, Mantravadi AV. Three-Dimensional Printing and Its Applications in Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery. *Otolaryngol Head Neck Surg.* 2017 Jun;156(6):999–1010. doi:10.1177/0194599816678372 PubMed PMID: 28421875.
9. Marti P, Lampus F, Benevento D, Setacci C. Trends in use of 3D printing in vascular surgery: a survey. *Int Angiol.* 2019 Oct;38(5):418–24. doi:10.23736/S0392-9590.19.04148-8 PubMed PMID: 31560185.
10. Liew Y, Beveridge E, Demetriades AK, Hughes MA. 3D printing of patient-specific anatomy: A tool to improve patient consent and enhance imaging interpretation by trainees. *Br J Neurosurg.* 2015;29(5):712–4. doi:10.3109/02688697.2015.1026799 PubMed PMID: 25822093.
11. Ventola CL. Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses. *P T.* 2014 Oct;39(10):704–11. PubMed PMID: 25336867; PubMed Central PMCID: PMC4189697.
12. Kappanayil M, Koneti NR, Kannan RR, Kottayil BP, Kumar K. Three-dimensional-printed cardiac prototypes aid surgical decision-making and preoperative planning in selected cases of complex congenital heart diseases: Early experience and proof of concept in a resource-limited environment. *Annals of Pediatric Cardiology [Internet].* 2017;10(2). Available from:



[https://journals.lww.com/aopc/fulltext/2017/10020/three\\_dimensional\\_printed\\_cardiac\\_prototypes\\_aid.3.aspx](https://journals.lww.com/aopc/fulltext/2017/10020/three_dimensional_printed_cardiac_prototypes_aid.3.aspx)

13. Nagarajan N, Dupret-Bories A, Karabulut E, Zorlutuna P, Vrana NE. Enabling personalized implant and controllable biosystem development through 3D printing. *Biotechnol Adv.* 2018 Apr;36(2):521–33. doi:10.1016/j.biotechadv.2018.02.004 PubMed PMID: 29428560.
14. Ballard DH, Mills P, Duszak RJ, Weisman JA, Rybicki FJ, Woodard PK. Medical 3D Printing Cost-Savings in Orthopedic and Maxillofacial Surgery: Cost Analysis of Operating Room Time Saved with 3D Printed Anatomic Models and Surgical Guides. *Acad Radiol.* 2020 Aug;27(8):1103–13. doi:10.1016/j.acra.2019.08.011 PubMed PMID: 31542197; PubMed Central PMCID: PMC7078060.
15. Trenfield SJ, Awad A, Madla CM, Hatton GB, Firth J, Goyanes A, et al. Shaping the future: recent advances of 3D printing in drug delivery and healthcare. *Expert Opinion on Drug Delivery.* 2019 Oct 3;16(10):1081–94. doi:10.1080/17425247.2019.1660318
16. Muwaffak Z, Goyanes A, Clark V, Basit AW, Hilton ST, Gaisford S. Patient-specific 3D scanned and 3D printed antimicrobial polycaprolactone wound dressings. *Int J Pharm.* 2017 Jul 15;527(1–2):161–70. doi:10.1016/j.ijpharm.2017.04.077 PubMed PMID: 28461267.
17. Tack P, Victor J, Gemmel P, Annemans L. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review. *BioMedical Engineering OnLine.* 2016 Oct 21;15. doi:10.1186/s12938-016-0236-4
18. Gibson I, Rosen D, Stucker B, Khorasani M. *Additive Manufacturing Technologies* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2021 [cited 2026 Mar 1]. Available from: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-56127-7> doi:10.1007/978-3-030-56127-7
19. Rengier F, Mehndiratta A, von Tengg-Kobligh H, Zechmann CM, Unterhinninghofen R, Kauczor HU, et al. 3D printing based on imaging data: review of medical applications. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2010 Jul;5(4):335–41. doi:10.1007/s11548-010-0476-x PubMed PMID: 20467825.
20. Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KTQ, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering.* 2018 Jun 15;143:172–96. doi:10.1016/j.compositesb.2018.02.012
21. Martelli N, Serrano C, Van Den Brink H, Pineau J, Prognon P, Borget I, et al. Advantages and disadvantages of 3-dimensional printing in surgery: A systematic review. *Surgery.* 2016 Jun 1;159 6:1485–500. doi:10.1016/j.surg.2015.12.017
22. Chua CK, Leong KF. *3d Printing And Additive Manufacturing: Principles And Applications (With Companion Media Pack) - Fourth Edition Of Rapid Prototyping.* World Scientific Publishing Company; 2014. 547 p.
23. Berman B. 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons.* 2012 Mar 1;55(2):155–62. doi:10.1016/j.bushor.2011.11.003
24. Tymrak BM, Kreiger M, Pearce JM. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design.* 2014 Jun 1;58:242–6. doi:10.1016/j.matdes.2014.02.038

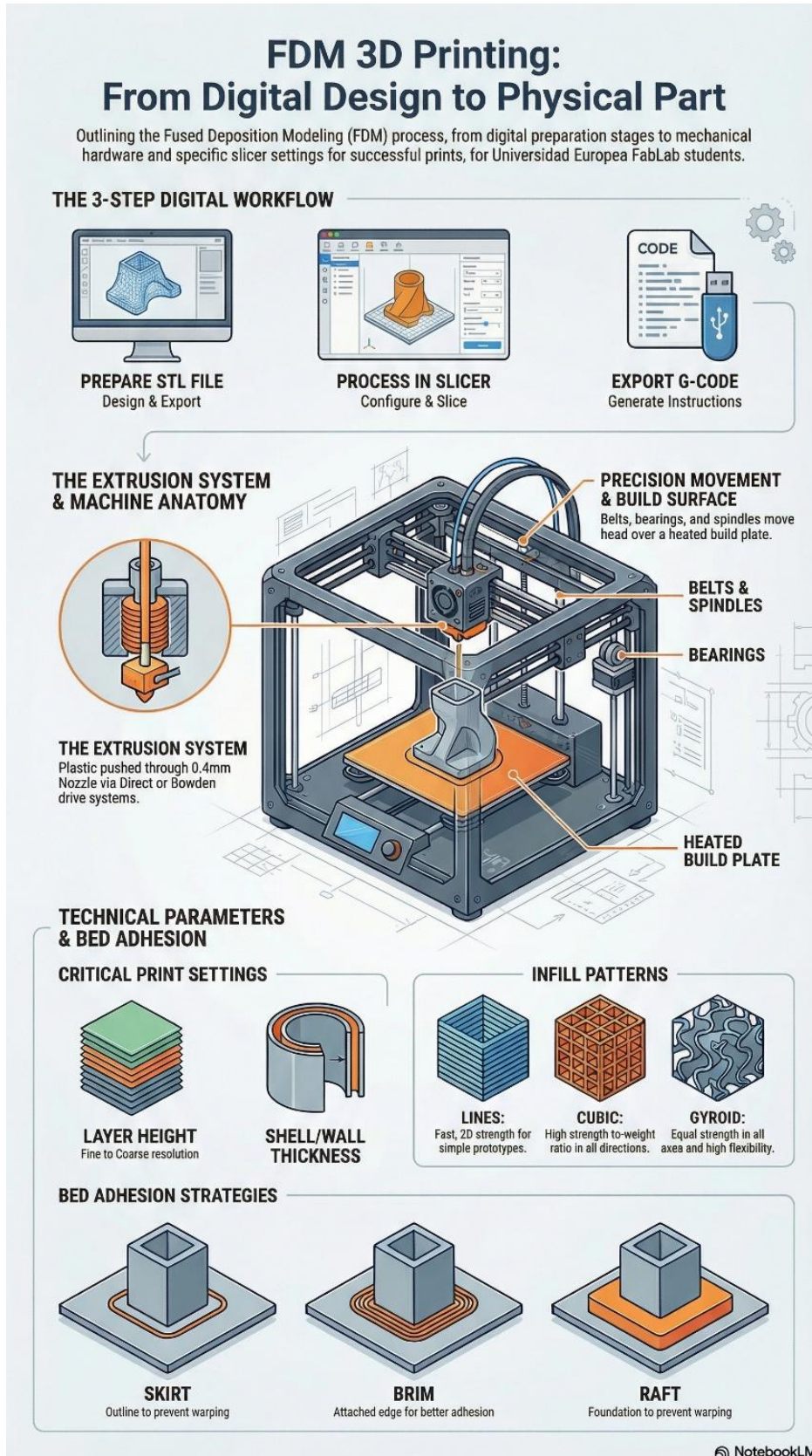


25. Li H, Lv H, Lin T. Comparison of efficacy of eight treatments for plantar fasciitis: A network meta-analysis. *Journal of Cellular Physiology*. 2018;234(1):860–70. doi:10.1002/jcp.26907
26. Liaw C, Guvendiren M. Current and emerging applications of 3D printing in medicine. *Biofabrication*. 2017 Jun 7;9. doi:10.1088/1758-5090/aa7279
27. Horta-Martínez L. 3D printing in the medical field. *Seminars in Medical Writing and Education*. 2022 Aug 31. doi:10.56294/mw20228
28. ŞENAYLI A, ÇANKAYA G, ÖZTORUN Cİ, OFLAZ H, ŞENEL E. Clinical trials of 3D printing splints to avoid contracture development in burned children. *Turk J Med Sci*. 2021 Oct 21;51(5):2543–53. doi:10.3906/sag-2104-170 PubMed PMID: 34174795; PubMed Central PMCID: PMC8742488.
29. Hassan BB, Wong MS. Contemporary and Future Development of 3D Printing Technology in the Field of Assistive Technology, Orthotics and Prosthetics. *Can Prosthet Orthot J*. 2023;6(2):42225. doi:10.33137/cpoj.v6i2.42225 PubMed PMID: 38873130; PubMed Central PMCID: PMC11168594.
30. Mendaza-DeCal R, Peso-Fernandez S, Rodriguez-Quiros J. Orthotics and prosthetics by 3D-printing: Accelerating its fabrication flow. *Res Vet Sci*. 2023 Sep;162:104960. doi:10.1016/j.rvsc.2023.104960 PubMed PMID: 37480718.
31. Kermavnar T, Shannon A, O’Sullivan KJ, McCarthy C, Dunne CP, O’Sullivan LW. Three-Dimensional Printing of Medical Devices Used Directly to Treat Patients: A Systematic Review. *3D Print Addit Manuf*. 2021 Dec 1;8(6):366–408. doi:10.1089/3dp.2020.0324 PubMed PMID: 36655011; PubMed Central PMCID: PMC9828627.
32. Kadakia RJ, Wixted CM, Allen NB, Hanselman AE, Adams SB. Clinical applications of custom 3D printed implants in complex lower extremity reconstruction. *3D Print Med*. 2020 Oct 2;6:29. doi:10.1186/s41205-020-00083-4 PubMed PMID: 33006702; PubMed Central PMCID: PMC7531160.
33. Choonara Y, Du Toit L, Kumar P, Kondiah P, Pillay V. 3D-printing and the effect on medical costs: a new era? *Expert Review of Pharmacoeconomics & Outcomes Research*. 2016 Jan 2;16:23–32. doi:10.1586/14737167.2016.1138860
34. Yasli M, Dabbagh SR, Tasoglu S, Aydin S. Additive manufacturing and three-dimensional printing in obstetrics and gynecology: a comprehensive review. *Arch Gynecol Obstet*. 2023 Dec;308(6):1679–90. doi:10.1007/s00404-023-06912-1 PubMed PMID: 36635490.
35. Melnyk LA, Oyewumi MO. Integration of 3D printing technology in pharmaceutical compounding: Progress, prospects, and challenges. *Annals of 3D Printed Medicine*. 2021;4:100035. doi:https://doi.org/10.1016/j.stlm.2021.100035
36. Murphy SV, Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nat Biotechnol*. 2014 Aug;32(8):773–85. doi:10.1038/nbt.2958 PubMed PMID: 25093879.
37. Bose S, Vahabzadeh S, Bandyopadhyay A. Bone tissue engineering using 3D printing. *Materials Today*. 2013 Dec 1;16(12):496–504. doi:10.1016/j.mattod.2013.11.017
38. Gao Q, Lee JS, Kim BS, Gao G. Three-dimensional printing of smart constructs using stimuli-responsive biomaterials: A future direction of precision medicine. *Int J Bioprint*. 2022



- Nov 9;9(1):638. doi:10.18063/ijb.v9i1.638 PubMed PMID: 36636137; PubMed Central PMCID: PMC9830998.
39. Li J, Esteban-Fernández de Ávila B, Gao W, Zhang L, Wang J. Micro/Nanorobots for Biomedicine: Delivery, Surgery, Sensing, and Detoxification. *Sci Robot.* 2017 Mar 15;2(4):eaam6431. doi:10.1126/scirobotics.aam6431 PubMed PMID: 31552379; PubMed Central PMCID: PMC6759331.
40. Kulisch C, Langheinrich J, Heuckendorf E, Vida I, Brunk I. Challenges and implementation of the German maternity protection act for female medical students in macroscopic anatomical education. *GMS J Med Educ.* 2020;37(2):Doc17. doi:10.3205/zma001310 PubMed PMID: 32328519; PubMed Central PMCID: PMC7171363.
41. Morrison RJ, Kashlan KN, Flanagan CL, Wright JK, Green GE, Hollister SJ, et al. Regulatory Considerations in the Design and Manufacturing of Implantable 3D-Printed Medical Devices. *Clin Transl Sci.* 2015 Oct;8(5):594–600. doi:10.1111/cts.12315 PubMed PMID: 26243449; PubMed Central PMCID: PMC4626249.
42. Ballard DH, Trace AP, Ali S, Hodgdon T, Zygmunt ME, DeBenedictis CM, et al. Clinical Applications of 3D Printing: Primer for Radiologists. *Acad Radiol.* 2018 Jan;25(1):52–65. doi:10.1016/j.acra.2017.08.004 PubMed PMID: 29030285; PubMed Central PMCID: PMC6404775.
43. Murphy SV, Atala A. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nat Biotechnol.* 2014 Aug;32(8):773–85. doi:10.1038/nbt.2958 PubMed PMID: 25093879.
44. Ford S, Despeisse M. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production.* 2016 Nov 20;137:1573–87. doi:10.1016/j.jclepro.2016.04.150
45. Thomas D. Costs, Benefits, and Adoption of Additive Manufacturing: A Supply Chain Perspective. *Int J Adv Manuf Technol.* 2016 Jul;85(5–8):1857–76. doi:10.1007/s00170-015-7973-6 PubMed PMID: 28747809; PubMed Central PMCID: PMC5524380.

Aneks 1: Zasady działania druku 3D





**Annex II. Comparative Overview of 3D Printing Technologies in Healthcare.**

<b>3D Process Type</b>	<b>Working Principle</b>	<b>Healthcare Applications</b>	<b>Advantages</b>	<b>Limitations</b>
<b>Powder Bed Fusion (SLS / SLM)</b>	Thermal energy selectively fuses powdered material inside a chamber	Medical implants, fixation devices, lattice-structured models	Small-scale technology, economical, wide range of materials	Low speed, limited size, material properties depend on powder grain
<b>Material Jetting (PolyJet / NJP)</b>	Inkjet-like deposition of material (continuous or drop-on-demand)	Anatomical models, customized dental guides and implants	High precision, low waste, multi-material and multi-color capability	Limited to polymers and waxes, requires support material
<b>Sheet Lamination</b>	Bonding of layered sheets (typically metal) via ultrasonic welding	Surgical and orthopedic models	Fast, economical, easy material handling	Limited material range, requires post-processing
<b>Directed Energy Deposition (DED, LMD, LENS)</b>	Heat source melts material during deposition, often for repair	Limited healthcare applications; repair of specific components	Rapid layer deposition, dense parts, no supports required	Limited materials, lower surface finish quality
<b>Vat Photopolymerization (SLA / DLP)</b>	Liquid photopolymer resin cured by UV or laser light	Bone structures, dental models, implant guides, hearing aids	High resolution and surface finish, complex geometries	Limited durability, UV sensitivity, not suitable for intensive use
<b>Material Extrusion (FDM / FFF)</b>	Thermoplastic extruded through heated nozzle layer by layer	Medical devices, surgical tools, prostheses	Economical, widely accessible, good structural properties (ABS)	Lower precision, nozzle-dependent quality, low speed
<b>Binder Jetting</b>	Powder layers bonded by liquid binder	Educational anatomical models, colored models	Fast fabrication, wide color range	Not ideal for structural parts, extensive cleaning/post-processing required

Training Educational Course on innovative HEALTHcare technologies.  
KA210-VET - Small-scale partnerships in vocational education and training (KA210-VET).  
Project Number: 2024-1-PL01-KA210-VET-000243362



Fundación  
**San Juan de Dios**  
Madrid

*Gemma Escobar Aguilar*

*María Simarro González*

*Manuel Lara Romero*

*Pedro Chana Valero*