



Fundusze Europejskie  
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita  
Polska

Dofinansowane przez  
Unię Europejską



Politechnika Świętokrzyska  
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn

Kierunek studiów:  
**Transport i Logistyka**

**Damian Frej, Marek Jaśkiewicz**

Materiały dydaktyczne do przedmiotu

## **Analiza ruchu na podstawie informacji wizyjnej**

opracowane w ramach realizacji Projektu  
**„Dostosowanie kształcenia  
w Politechnice Świętokrzyskiej do potrzeb  
współczesnej gospodarki”**  
FERS.01.05-IP.08-0234/23

Kielce, 2024





## Spis treści

1. Teoria analizy ruchu ciał materialnych i klasyfikacja zderzeń .....	2
2. Oprogramowanie TEMA – funkcje, określanie punktów do śledzenia .....	4
3. Urządzenia i narzędzia do rejestracji ruchu, kamery szybkie.....	7
4. Specyfika rejestracji szybkozmiennych zjawisk.....	9
5. Symulacja analizy ruchu obiektu, wyznaczanie trajektorii .....	11
6. Literatura .....	22



Materiały dydaktyczne objęte licencją Creative Commons BY 4.0.

Licencja dostępna pod adresem: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



# 1. Teoria analizy ruchu ciał materialnych i klasyfikacja zderzeń

Analiza ruchu ciał materialnych, zwłaszcza w kontekście zderzeń, jest kluczowym zagadnieniem w mechanice klasycznej i ma istotne zastosowanie w rekonstrukcji wypadków drogowych. Ruch ciał materialnych opisuje się za pomocą parametrów takich jak prędkość, przyspieszenie oraz trajektoria. W analizie zderzeń istotne jest zrozumienie, jak siły działające podczas kolizji wpływają na zmianę tych parametrów. Zastosowanie znajdują tutaj zasady dynamiki Newtona, które pozwalają na modelowanie i przewidywanie zachowania ciał podczas zderzeń. W praktyce, analiza teoretyczna często dotyczy zderzeń doskonale sprężystych lub doskonale niesprężystych (plastycznych). Jednak w rzeczywistości mamy do czynienia ze zderzeniami sprężysto-plastycznymi, co wymaga uwzględnienia właściwości fizycznych zderzających się ciał. Zderzenia można klasyfikować na podstawie różnych kryteriów (Frej, 2023; Gomółka, Twaróg, Żesławska, Drałus, 2017; SkyFi, 2022):

1. Ze względu na charakter odkształceń:
  - Sprężyste: Ciała po zderzeniu powracają do pierwotnych kształtów, a energia kinetyczna jest zachowana.
  - Niesprężyste (plastyczne): Ciała ulegają trwałym odkształceniom, a część energii kinetycznej jest tracona na odkształcenia i ciepło.
2. Ze względu na kierunek działania sił:
  - Centralne: Linie działania sił przechodzą przez środki mas obu ciał.
  - Ekscentryczne: Linie działania sił nie przechodzą przez środki mas, co prowadzi do powstania momentów obrotowych.
3. Ze względu na liczbę uczestniczących ciał:
  - Dwuciałowe: Zderzenie dotyczy dwóch ciał.
  - Wielociałowe: W zderzeniu uczestniczy więcej niż dwa ciała.
4. Ze względu na kąt zderzenia:
  - Czołowe: Ciała poruszają się wprost na siebie.
  - Boczne: Zderzenie następuje pod kątem, często spotykane w wypadkach drogowych.

Podczas zderzenia kluczowe są następujące zasady (SkyFi, 2022; Poliak et al., 2024; Zaborska, Jochymczyk-Woźniak, Wodarski, Bieniek, 2015):



- Zasada zachowania pędu: W układzie izolowanym całkowity pęd przed zderzeniem jest równy całkowitemu pędowi po zderzeniu.
- Zasada zachowania energii: W zderzeniach sprężystych energia kinetyczna jest zachowana, natomiast w niesprężystych część energii jest tracona na odkształcenia i inne formy energii.
- Współczynnik restytucji: Określa stosunek prędkości względnej oddalania się ciał po zderzeniu do prędkości względnej zbliżania się przed zderzeniem. Wartość tego współczynnika pozwala na modelowanie zderzeń rzeczywistych, które są zazwyczaj sprężysto-plastyczne.

Zrozumienie tych zasad umożliwia modelowanie zderzeń i przewidywanie zachowania ciał po kolizji, co jest niezbędne w analizie wypadków oraz projektowaniu systemów bezpieczeństwa w pojazdach.

Zjawiska szybkozmienne, takie jak zderzenia, eksplozje czy dynamiczne odkształcenia materiałów, odgrywają istotną rolę w mechanice i inżynierii, szczególnie w kontekście bezpieczeństwa konstrukcji oraz ochrony życia ludzkiego. Są to procesy charakteryzujące się gwałtownymi zmianami parametrów fizycznych, takich jak prędkość, przyspieszenie czy siła, zachodzącymi w bardzo krótkim czasie, często liczonym w milisekundach lub mikrosekundach. Analiza tych zjawisk wymaga zaawansowanych metod badawczych i narzędzi, które pozwalają na uchwycenie ich dynamiki oraz szczegółowe modelowanie ich skutków.

Zjawiska szybkozmienne wiążą się z bardzo intensywnymi interakcjami mechanicznymi. Przykładami są zderzenia pojazdów, wybuchy, uderzenia pocisków czy gwałtowne odkształcenia materiałów. Zrozumienie tych procesów wymaga stosowania specjalistycznych metod badawczych. Jednym z podstawowych narzędzi jest szybkoklatkowa rejestracja wideo, która umożliwia uchwycenie szczegółów procesu z częstotliwością rzędu tysięcy lub nawet milionów klatek na sekundę. Dzięki niej możliwe jest badanie deformacji materiałów, trajektorii ruchu oraz lokalizacji miejsc krytycznych, w których mogą wystąpić uszkodzenia. Oprócz rejestracji wizualnej stosuje się również czujniki piezoelektryczne, które mierzą gwałtowne zmiany sił i ciśnień w czasie rzeczywistym, co jest szczególnie przydatne w analizie wypadków drogowych i eksplozji (Gomółka, Twaróg, Żesławska, Drałus, 2017; SkyFi, 2023).

Analiza zjawisk szybkozmiennych opiera się również na symulacjach komputerowych, które umożliwiają modelowanie tych procesów w środowisku wirtualnym. Metoda elementów skończonych (MES) jest jednym z najczęściej wykorzystywanych narzędzi w tym obszarze. Programy takie jak LS-DYNA, Abaqus czy Ansys pozwalają na szczegółowe modelowanie zderzeń, odkształceń materiałów czy propagacji fal uderzeniowych. Symulacje te uwzględniają właściwości materiałowe, zmienne warunki brzegowe oraz nieliniowe interakcje mechaniczne.



Dzięki nim możliwe jest dokładne przewidywanie skutków dynamicznych obciążeń i optymalizacja konstrukcji pod kątem odporności na tego typu zjawiska.

Zastosowanie analizy zjawisk szybkozmiennych jest niezwykle szerokie. W inżynierii transportu wykorzystuje się ją do testowania systemów bezpieczeństwa w pojazdach, takich jak pasy bezpieczeństwa, poduszki powietrzne czy strefy zgniotu. Testy zderzeniowe pozwalają na ocenę skuteczności tych systemów w minimalizowaniu ryzyka obrażeń pasażerów. W przemyśle zbrojeniowym analiza dynamicznych odkształceń i propagacji fal uderzeniowych jest kluczowa dla projektowania ochrony balistycznej i odporności na eksplozje. W biomechanice stosuje się ją do badania skutków dynamicznych obciążeń na ciało ludzkie, co umożliwi rozwój zaawansowanych systemów ochronnych oraz lepsze zrozumienie mechanizmów powstawania urazów. Inżynieria budowlana korzysta z tych analiz w projektowaniu konstrukcji odpornych na trzęsienia ziemi oraz inne gwałtowne obciążenia dynamiczne.

Jednym z kluczowych wyzwań w analizie zjawisk szybkozmiennych jest precyzyjne odwzorowanie zjawisk fizycznych. Modele numeryczne muszą uwzględniać nieliniowe właściwości materiałów, zjawiska cieplne oraz interakcje między elementami konstrukcji. Wymaga to zaawansowanych metod obliczeniowych oraz dużej mocy obliczeniowej. Równocześnie analiza generuje ogromne ilości danych, które muszą być precyzyjnie przetwarzane i interpretowane.

Przykładowo, w analizie zderzeń pojazdów stosuje się zarówno eksperymenty fizyczne, jak i symulacje komputerowe. Rejestracja szybkich procesów deformacji karoserii oraz ocena działania systemów ochronnych pozwalają na projektowanie pojazdów o zwiększonej odporności na zderzenia. Jednocześnie modele biomechaniczne, takie jak manekiny z czujnikami, dostarczają informacji o ryzyku urazów głowy, szyi czy klatki piersiowej w różnych scenariuszach zderzeniowych.

Analiza zjawisk szybkozmiennych jest kluczowa dla zrozumienia dynamicznych procesów mechanicznych i ich wpływu na konstrukcje oraz organizmy żywe. Dzięki zaawansowanym technikom rejestracji i modelowania możliwe jest projektowanie bardziej efektywnych systemów ochronnych, co przyczynia się do poprawy bezpieczeństwa w różnych dziedzinach życia i przemysłu. W miarę postępu technologicznego metody te będą stawały się coraz bardziej precyzyjne, otwierając nowe możliwości w badaniach naukowych i praktycznych zastosowaniach.

## 2. Oprogramowanie TEMA – funkcje, określanie punktów do śledzenia

TEMA (TrackEye Motion Analysis) to zaawansowane oprogramowanie przeznaczone do analizy ruchu w zjawiskach dynamicznych, takich jak zderzenia,



odkształcenia czy procesy przemysłowe. Jest szeroko stosowane w biomechanice, inżynierii mechanicznej, przemyśle motoryzacyjnym i badaniach naukowych. Jego głównym zadaniem jest umożliwienie precyzyjnego śledzenia ruchu obiektów w nagraniach wideo, co pozwala na szczegółową analizę parametrów kinematycznych i dynamicznych. TEMA oferuje szereg zaawansowanych funkcji umożliwiających kompleksową analizę ruchu, w tym (Frej, 2023, EC-TC, 2024):

1. Śledzenie punktów. TEMA pozwala na automatyczne i ręczne śledzenie punktów na obrazie wideo. Użytkownik może definiować punkty na obiektach, które mają być analizowane, a oprogramowanie rejestruje ich pozycje w kolejnych klatkach filmu.
2. Analiza kinematyczna. Oprogramowanie umożliwia obliczanie podstawowych parametrów ruchu, takich jak:
  - o Prędkość liniowa i kąтова.
  - o Przyspieszenie.
  - o Przemieszczenie obiektu w przestrzeni.
3. Transformacja współrzędnych. TEMA pozwala na kalibrację przestrzeni pomiarowej oraz transformację współrzędnych z obrazu wideo na rzeczywiste układy odniesienia. Dzięki temu można analizować ruch w wymiarze rzeczywistym (np. w metrach lub stopniach).
4. Synchronizacja danych. Oprogramowanie umożliwia synchronizację z danymi z innych czujników (np. akcelerometrów czy tensometrów), co pozwala na kompleksową analizę dynamicznych zjawisk.
5. Analiza deformacji. TEMA jest w stanie rejestrować i analizować deformacje obiektów w czasie, co jest szczególnie przydatne w testach zderzeniowych i badaniach materiałowych.
6. Tworzenie wykresów i raportów. Dane z analizy mogą być przedstawiane w formie wykresów i tabel, co ułatwia ich interpretację i umożliwia generowanie profesjonalnych raportów z badań.
7. Śledzenie wielopunktowe. Oprogramowanie obsługuje śledzenie wielu punktów jednocześnie, co pozwala na analizę złożonych układów, takich jak odkształcenia konstrukcji podczas zderzenia.
8. Obsługa wysokiej częstotliwości próbkowania. TEMA jest przystosowane do pracy z kamerami szybkimi, co pozwala na analizę zjawisk dynamicznych zachodzących w krótkim czasie.

W TEMA określenie punktów do śledzenia jest kluczowym etapem przygotowania analizy. Wybór odpowiednich punktów decyduje o precyzji i wiarygodności wyników. Proces ten obejmuje (Frej, 2023; Frej, 2024; EC-TC, 2024):

1. Ręczne wskazanie punktów. Użytkownik może ręcznie zaznaczyć punkty na obrazie, które mają być śledzone. Jest to przydatne w sytuacjach, gdy obiekt



ma nieregularny kształt lub gdy automatyczne śledzenie jest niewystarczająco precyzyjne.

2. Automatyczne śledzenie punktów. TEMA posiada funkcje automatycznego śledzenia punktów na podstawie kontrastu lub innych właściwości obrazu.

Algorytmy wykorzystują technologie takie jak:

- o Analiza gradientów.
  - o Dopasowanie wzorca.
  - o Filtry predykcyjne, które prognozują położenie punktów w kolejnych klatkach.
3. Definiowanie markerów. W testach często stosuje się znaczniki (markery) o wysokim kontraście, które są łatwe do śledzenia przez oprogramowanie. Mogą to być punkty namalowane na obiektach lub elementy fluorescencyjne widoczne w kamerach szybkich.
  4. Kalibracja przestrzeni pomiarowej. W celu przekształcenia współrzędnych obrazu na wartości rzeczywiste, konieczne jest przeprowadzenie kalibracji. Użytkownik definiuje punkty odniesienia w znanej przestrzeni, co pozwala na dokładne odwzorowanie ruchu w jednostkach fizycznych (np. w metrach).
  5. Weryfikacja śledzenia. Po zdefiniowaniu punktów użytkownik może weryfikować, czy algorytm prawidłowo śledzi ruch. W razie potrzeby można ręcznie korygować błędy lub dostosować parametry śledzenia.

Przykłady zastosowania oprogramowania TEMA (EC-TC, 2024):

1. Testy zderzeniowe. TEMA jest szeroko stosowane w analizie testów zderzeniowych pojazdów. Śledzenie punktów na karoserii, manekinach i elementach wyposażenia pozwala na szczegółową ocenę deformacji oraz ryzyka urazów pasażerów.
2. Biomechanika ruchu. Oprogramowanie jest używane w badaniach nad biomechaniką człowieka, takich jak analiza ruchu podczas aktywności fizycznej czy ocena skutków dynamicznych przeciążeń.
3. Inżynieria materiałowa. W testach wytrzymałościowych i badaniach deformacji materiałów TEMA umożliwia rejestrację i analizę odkształceń pod wpływem dynamicznych obciążeń.
4. Przemysł lotniczy i kosmiczny. Oprogramowanie służy do analizy ruchu elementów podczas testów aerodynamicznych, np. zachowania skrzydeł samolotu w tunelu aerodynamicznym.

TEMA to zaawansowane narzędzie analityczne, które dzięki swoim funkcjom pozwala na precyzyjną analizę zjawisk dynamicznych. Dzięki możliwości śledzenia punktów na obrazie wideo oraz zaawansowanym funkcjom analizy kinematycznej i dynamicznej, znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i przemysłu. Wybór odpowiednich punktów do śledzenia oraz kalibracja przestrzeni są kluczowe dla



uzyskania wiarygodnych wyników, co czyni TEMA niezastąpionym narzędziem w analizie dynamicznych procesów.

### 3. Urządzenia i narzędzia do rejestracji ruchu, kamery szybkie

Urządzenia i narzędzia do rejestracji ruchu odgrywają kluczową rolę w analizie zjawisk dynamicznych, takich jak zderzenia, eksplozje czy procesy biomechaniczne. Wśród nich najważniejsze są kamery szybkie, które umożliwiają uchwycenie szczegółów procesów zachodzących w krótkich przedziałach czasowych, niewidocznych dla ludzkiego oka. Kamery szybkie to specjalistyczne urządzenia zdolne do rejestracji obrazu z bardzo wysoką częstotliwością, sięgającą od tysięcy do milionów klatek na sekundę. Dzięki temu możliwe jest dokładne badanie ruchu w ekstremalnych warunkach, takich jak testy zderzeniowe czy analiza biomechaniczna (Frej, 2024; Gomółka, Twaróg, Żesławska, Drałus, 2017; EC-TC, 2024).

Kamery szybkie charakteryzują się wysoką częstotliwością rejestracji, krótkim czasem ekspozycji oraz zdolnością do pracy w wysokiej rozdzielczości. Modele takie jak Phantom VEO, Photron FASTCAM czy Vision Research Phantom Flex są szeroko wykorzystywane w przemyśle i badaniach naukowych. Na przykład w testach zderzeniowych pozwalają na analizę deformacji pojazdów, ruchu manekinów oraz skuteczności systemów ochronnych, takich jak pasy bezpieczeństwa czy poduszki powietrzne. W biomechanice umożliwiają badanie ruchu ciała ludzkiego podczas aktywności fizycznej lub w warunkach ekstremalnych przeciążeń. Z kolei w inżynierii materiałowej kamery szybkie służą do obserwacji dynamicznych odkształceń i pęknięcia materiałów pod wpływem dużych sił. Kamery szybkie nie są jednak wyłącznie urządzeniami, które pozwalają zobaczyć dane zjawisko w zwolnionym tempie. Uzupełnione o specjalistyczne oprogramowanie stanowią potężne urządzenia pomiarowe dające informacje o przemieszczeniach, prędkościach i przyspieszeniach (EC-TC). Na rysunku 1. Przedstawiono kamerę szybką Phantom v310.

[Tekst alternatywny: Zdjęcie kamery szybkiej Phantom v310. Kamera ma srebrno-czarną obudowę, dużą soczewkę i uchwyt zamontowany na górze. Jest to zaawansowane urządzenie stosowane do precyzyjnej rejestracji szybkiego ruchu, szczególnie przydatne w biomechanice, ergonomii i badaniach dynamicznych zjawisk, takich jak zderzenia czy eksplozje.]





**Rys 1.** Kamera szybka Phantom v310.

Oprócz kamer szybkich stosuje się również inne zaawansowane narzędzia do rejestracji ruchu. Systemy optyczne z markerami, takie jak Vicon czy OptiTrack, pozwalają na precyzyjne śledzenie ruchu obiektów w przestrzeni trójwymiarowej, co jest szczególnie przydatne w biomechanice i ergonomii. Czujniki piezoelektryczne i akcelerometry mierzą siły, przyspieszenia i ciśnienia podczas dynamicznych zjawisk, takich jak zderzenia czy eksplozje. Systemy radarowe i radary są wykorzystywane do monitorowania ruchu w większej skali, na przykład pojazdów na torach testowych. Kamery termowizyjne z kolei pozwalają na rejestrację zmian temperatury w czasie rzeczywistym, co znajduje zastosowanie w badaniach tarcia czy eksplozji (Poliak et al., 2024; EC-TC, 2024).

Dane zebrane za pomocą tych urządzeń są analizowane przy użyciu zaawansowanego oprogramowania, takiego jak TEMA czy TrackEye. Oprogramowanie to umożliwia śledzenie punktów na zarejestrowanych obrazach, obliczanie prędkości, przyspieszenia i trajektorii ruchu, a także synchronizację danych z innymi czujnikami. Dzięki temu możliwa jest kompleksowa analiza dynamicznych procesów, w tym tworzenie wykresów i raportów z badań.

Rejestracja ruchu i analiza danych znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach. W przemyśle motoryzacyjnym służą do testowania systemów bezpieczeństwa pojazdów oraz oceny ryzyka obrażeń pasażerów. W biomechanice wspomagają badania nad urazami i rehabilitacją, umożliwiając projektowanie zaawansowanych rozwiązań ochronnych. W inżynierii materiałowej pozwalają na testowanie odporności materiałów na dynamiczne obciążenia, a w przemyśle zbrojeniowym są kluczowe dla analizy balistycznej i odporności na eksplozje (EC-TC, 2024; SkyFi, 2023).

Urządzenia do rejestracji ruchu, zwłaszcza kamery szybkie, stanowią nieodzowny element badań dynamicznych procesów. Ich zastosowanie w połączeniu z zaawansowanymi technologiami analitycznymi umożliwia precyzyjne modelowanie,



zrozumienie oraz optymalizację procesów mechanicznych i biologicznych, przyczyniając się do poprawy bezpieczeństwa i efektywności w różnych sektorach przemysłu i nauki (SkyFi, 2023; Zaborska, Jochymczyk-Woźniak, Wodarski, Bieniek, 2015).

## 4. Specyfika rejestracji szybkozmiennych zjawisk

Rejestracja zjawisk szybkozmiennych wymaga szczególnego podejścia ze względu na ich charakterystyczne cechy: bardzo krótkie czasy trwania, gwałtowne zmiany parametrów fizycznych oraz konieczność uchwycenia precyzyjnych detali procesu. W takich przypadkach kluczowe jest zastosowanie odpowiednio zaprojektowanych systemów pomiarowych, które nie tylko rejestrują dane z wystarczającą szybkością, ale również pozwalają na dokładną analizę dynamicznych procesów w krótkiej skali czasowej. Specyfika zjawisk szybkozmiennych oznacza konieczność rejestracji zdarzeń, które (Frej, 2023; Gomółka, Twaróg, Żesławska, Drałus, 2017; EC-TC, 2024):

- Mają wysoką dynamikę zmian, co wymaga rejestracji z bardzo krótkimi czasami ekspozycji.
- Generują dane w dużej ilości w krótkim czasie, co wymaga wysokiej przepustowości systemów zapisu.
- Wymagają precyzyjnego odwzorowania procesów przestrzennych i czasowych.

Kluczowe jest dostosowanie narzędzi rejestracyjnych do specyfiki zjawiska, takich jak jego skala, intensywność oraz kontekst zastosowania. Technologie dedykowane zjawiskom szybkozmiennym:

1. Zaawansowane systemy synchronizacji. Zjawiska szybkozmiennie często wymagają jednoczesnej rejestracji wielu parametrów (np. obrazu, sił, przyspieszeń). W takich przypadkach krytyczna jest precyzyjna synchronizacja urządzeń, aby dane z różnych źródeł można było analizować w sposób spójny.
2. Rejestratory danych o wysokiej przepustowości. W systemach rejestrujących zjawiska dynamiczne konieczne są rejestratory zdolne do przetwarzania ogromnych ilości danych w czasie rzeczywistym. Użycie pamięci o wysokiej przepustowości oraz zaawansowanych algorytmów kompresji pozwala na zapis dużej liczby klatek lub punktów pomiarowych w krótkim czasie.
3. Czujniki wielofunkcyjne. Współczesne systemy rejestracji często łączą różne rodzaje czujników w jednej platformie. Przykładem mogą być urządzenia integrujące rejestrację obrazu, pomiary ciśnienia, temperatury czy deformacji materiału.



Rejestracja zjawisk szybkozmiennych wymaga szczególnej dbałości o przygotowanie środowiska badawczego. Proces kalibracji obejmuje (EC-TC, 2024):

- Definiowanie punktów odniesienia dla kamer i czujników.
- Sprawdzenie dokładności pomiarów w warunkach ekstremalnych, takich jak wysoka prędkość obiektów czy silne przeciążenia.
- Testowanie systemów na symulowanych zjawiskach, aby upewnić się, że rejestracja w warunkach rzeczywistych przebiegnie prawidłowo.

Współczesne metody rejestracji zjawisk szybkozmiennych korzystają z technologii wspomaganych przez sztuczną inteligencję i zaawansowane algorytmy analizy danych. Dzięki temu możliwe jest:

- Automatyczne śledzenie i analiza punktów krytycznych zjawisk.
- Wykrywanie anomalii w danych, które mogą świadczyć o błędach rejestracji lub niespodziewanych efektach dynamicznych.
- Modelowanie zachowań zjawisk na podstawie zarejestrowanych danych w celu przewidywania ich dalszego przebiegu.

Przykłady unikalnych zastosowań:

1. Analiza wieloelementowych zderzeń w motoryzacji. Rejestracja zjawisk szybkozmiennych pozwala na analizę zderzeń z udziałem wielu pojazdów, uwzględniając interakcje między elementami konstrukcyjnymi oraz ruch pasażerów.
2. Obserwacja propagacji fal uderzeniowych w materiałach. W badaniach nad odpornością materiałów na eksplozje kluczowe jest precyzyjne uchwycenie momentu inicjacji fali uderzeniowej i jej wpływu na strukturę badanego obiektu.
3. Testy balistyczne w systemach ochrony osobistej. Dzięki rejestracji szybkozmiennych zjawisk można analizować deformacje osłon balistycznych oraz ich zdolność do rozpraszania energii kinetycznej pocisków.

Rejestracja zjawisk szybkozmiennych jest wyzwaniem technologicznym, które wymaga zaawansowanego sprzętu oraz precyzyjnego przygotowania środowiska badawczego. Specyfika tych procesów, takich jak gwałtowność zmian i krótki czas trwania, wymaga od urządzeń pomiarowych niezawodności, precyzji oraz zdolności do pracy w ekstremalnych warunkach. Dzięki postępowi technologicznemu możliwa jest coraz dokładniejsza analiza tych zjawisk, co przyczynia się do lepszego zrozumienia procesów dynamicznych i ich zastosowań w nauce oraz przemyśle (SkyFi, 2022; SkyFi, 2023).



## 5. Symulacja analizy ruchu obiektu, wyznaczenie trajektorii

Zarejestrowane testy zderzeniowe przy niskiej prędkości z udziałem ochotników zostały poddane analizie w programie TEMA CLASSIC, który jest przeznaczony do zaawansowanej analizy ruchu (Gomółka, Twaróg, Żesławska, Drałus, 2017; EC-TC, 2024; Frej, 2024). Umożliwia śledzenia obiektów na podstawie obrazu, a następnie przedstawienie wyników w tabelach i wykresach. Na rysunku 2 został przedstawiony ochotnik reprezentujący 50 centyl populacji mężczyzn, natomiast na rysunku 3 ochotniczka reprezentująca 50 centyl populacji kobiet. Ochotnicy na poszczególnych częściach ciała posiadają znacznik czarno-żółty, który jest rozpoznawany w programie. Na podstawie przemieszczenia znacznika zostaje zarejestrowana trajektoria ruchu poszczególnych części ciała. Osoby biorące udział w teście zderzeniowym przy niskiej prędkości posiadały znacznik na głowie, szyi, ramieniu, łokciu oraz kolanie.

[Tekst alternatywny: Na rysunku 2 widoczny jest mężczyzna reprezentujący 50 centyl populacji, siedzący na platformie testowej. Jest przypięty pasami, a na jego głowie, szyi, ramieniu, łokciu oraz kolanie umieszczono markery śledzące ruch. Na rysunku 3 przedstawiona jest kobieta reprezentująca 50 centyl populacji w podobnym ustawieniu, siedząca na platformie testowej z markerami na tych samych częściach ciała. Obie osoby uczestniczą w teście zderzeniowym przy niskiej prędkości. W tle widoczna jest siatka pomiarowa.]



**Rys. 2.** Mężczyzna reprezentujący 50 centyl populacji.



**Rys. 3.** Kobieta reprezentująca 50 centyl populacji.



Na rysunku 4 zostały przedstawione zostały kadry zarejestrowanego testu zderzeniowego ochotników przy prędkości 20 km/h. Dokonując analizy po klatkowej zarejestrowanych testów zderzeniowych, można zauważyć duże podobieństwo w przemieszczeniu głowy ochotników z uwzględnieniem płci. W celu dalszej weryfikacji zostały wyznaczone charakterystyki trajektorii ruchu głowy dla wszystkich centyl populacji z uwzględnieniem podziału na kobiety i mężczyźni. Charakterystyki zostały wyznaczone jako wartości maksymalne i minimalne przemieszczenia głowy wolontariuszy (korytarze przemieszczenia głowy) w danej grupie centylowej.

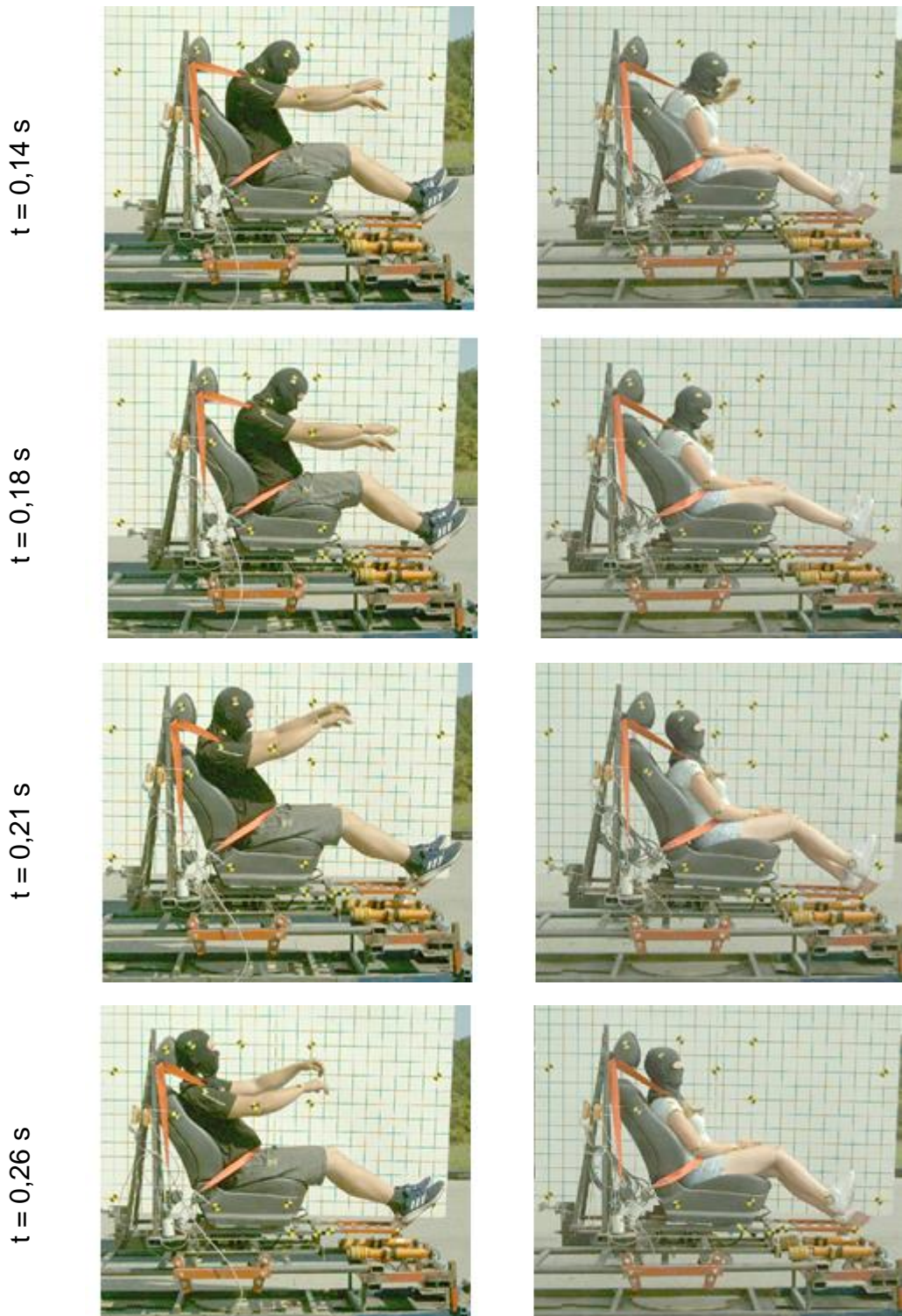
[Tekst alternatywny: Sekwencja kadrów przedstawiająca zderzenie ochotników przy niskiej prędkości (20 km/h). Każdy kadr pokazuje kolejne momenty zdarzenia w odstępach czasowych:  $t=0$ ,  $t=0.005$ ,  $t=0.0075$ ,  $t=0.0145$ ,  $t=0.0185$ ,  $t=0.021$ ,  $t=0.028$ ,  $t=0.035$  s. Na rysunku widać ochotników przypiętych do platformy testowej. Ich ciała reagują na siły zderzeniowe – głowa i ramiona przesuwają się w różnych kierunkach w zależności od fazy zderzenia. W tle znajduje się siatka pomiarowa.]

$t = 0,00$  s



$t = 0,07$  s





**Rys. 4.** Kadry z zderzenia ochotników przy niskiej prędkości Kadry testu zderzeniowego przy niskiej prędkości 20km/h.

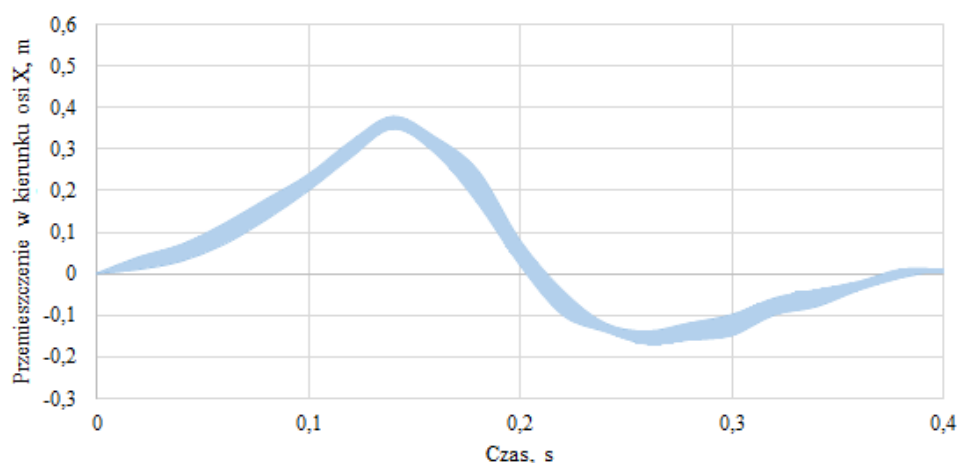


Przemieszczenia głowy ochotników w realizowanych testach zderzeniowych względem osi X zostały zawarte na rysunkach od 5 do 10. Przemieszczenie głowy ochotników mężczyzn C5 w pierwszej fazie zderzenia (0,14s – maksymalne wychylenie głowy do przodu) znajduje się w przedziale od 0,35 m do 0,38 m, natomiast w drugiej fazie zderzenia (0,26 s – maksymalne wychylenie głowy do tyłu) w przedziale od 0,14 m do 0,17 m. Przemieszczenie głowy ochotników kobiet C5 w pierwszej fazie zderzenia (0,14s – maksymalne wychylenie głowy do przodu) znajduje się w przedziale od 0,31 m do 0,35 m, natomiast w drugiej fazie zderzenia (0,26 s – maksymalne wychylenie głowy do tyłu) w przedziale od 0,12 m do 0,16 m.

Przemieszczenie głowy ochotników mężczyzn C50 w pierwszej fazie zderzenia (0,14s – maksymalne wychylenie głowy do przodu) znajduje się w przedziale od 0,47 m do 0,55 m, natomiast w drugiej fazie zderzenia (0,26 s – maksymalne wychylenie głowy do tyłu) w przedziale od 0,17 m do 0,21 m. Przemieszczenie głowy ochotników kobiet C50 w pierwszej fazie zderzenia (0,14s – maksymalne wychylenie głowy do przodu) znajduje się w przedziale od 0,43 m do 0,47 m, natomiast w drugiej fazie zderzenia (0,26 s – maksymalne wychylenie głowy do tyłu) w przedziale od 0,16 m do 0,24 m.

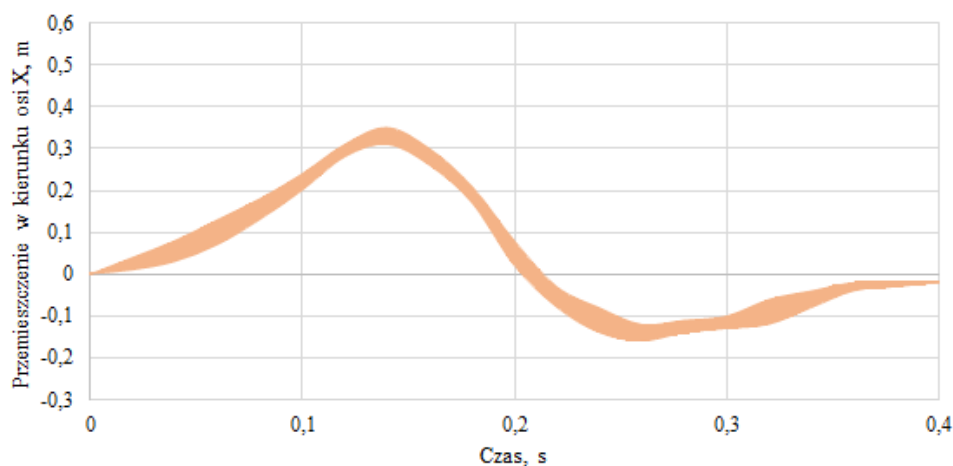
Przemieszczenie głowy ochotników mężczyzn C95 w pierwszej fazie zderzenia (0,14s – maksymalne wychylenie głowy do przodu) znajduje się w przedziale od 0,35 m do 0,38 m, natomiast w drugiej fazie zderzenia (0,26 s – maksymalne wychylenie głowy do tyłu) w przedziale od 0,14 m do 0,17 m. Przemieszczenie głowy ochotników kobiet C95 w pierwszej fazie zderzenia (0,14s – maksymalne wychylenie głowy do przodu) znajduje się w przedziale od 0,46 m do 0,51 m, natomiast w drugiej fazie zderzenia (0,26 s – maksymalne wychylenie głowy do tyłu) w przedziale od 0,15 m do 0,17 m.

[Tekst alternatywny: Wykres 5 przedstawia przemieszczenie głowy mężczyzny w punkcie C5 w kierunku osi X podczas testu zderzeniowego. Na osi X znajduje się czas w sekundach (od 0 do 0,4 s), a na osi Y przemieszczenie w metrach (od -0,2 do 0,6 m). Krzywa na wykresie wskazuje początkowy wzrost przemieszczenia, osiągnięcie maksymalnego wychylenia do przodu, a następnie spadek przemieszczenia do wartości ujemnych (wychylenie do tyłu) i stabilizację w końcowej fazie.]



**Rys. 5.** Przemieszczenie głowy mężczyzn C5 w kierunku osi X, podczas testu zderzeniowego.

[Tekst alternatywny: Wykres 6 przedstawia przemieszczenie głowy kobiet w punkcie C5 w kierunku osi X podczas testu zderzeniowego. Na osi X oznaczono czas w sekundach (od 0 do 0,4 s), a na osi Y przemieszczenie w metrach (od -0,2 do 0,6 m). Krzywa na wykresie (czerwona linia) pokazuje początkowy wzrost przemieszczenia do przodu, osiągnięcie maksymalnego wychylenia, a następnie spadek do wartości ujemnych (wychylenie do tyłu) i stabilizację na końcu testu.]



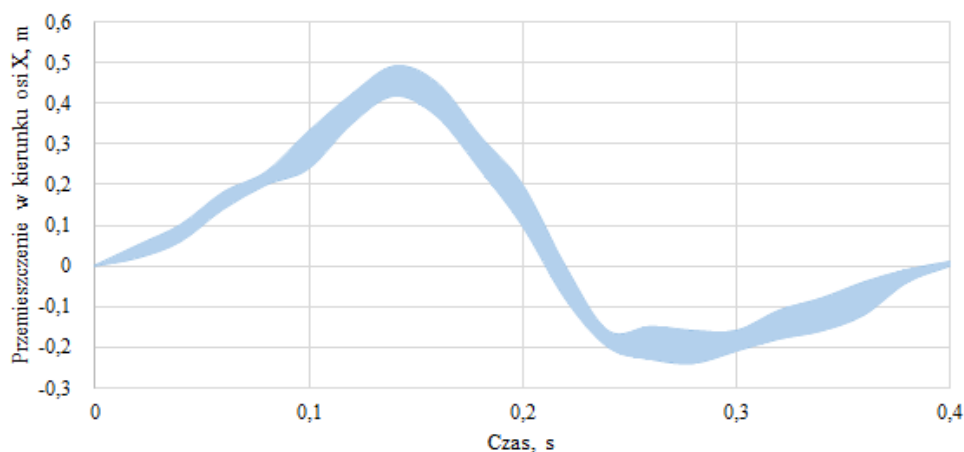
**Rys. 6.** Przemieszczenie głowy kobiet C5, w kierunku osi X, podczas testu zderzeniowego.

[Tekst alternatywny: Wykres 7 przedstawia przemieszczenie głowy mężczyzn w punkcie C50 w kierunku osi X podczas testu zderzeniowego. Oś pozioma (X) obrazuje czas w sekundach (od 0 do 0,4 s), a oś pionowa (Y) przemieszczenie w



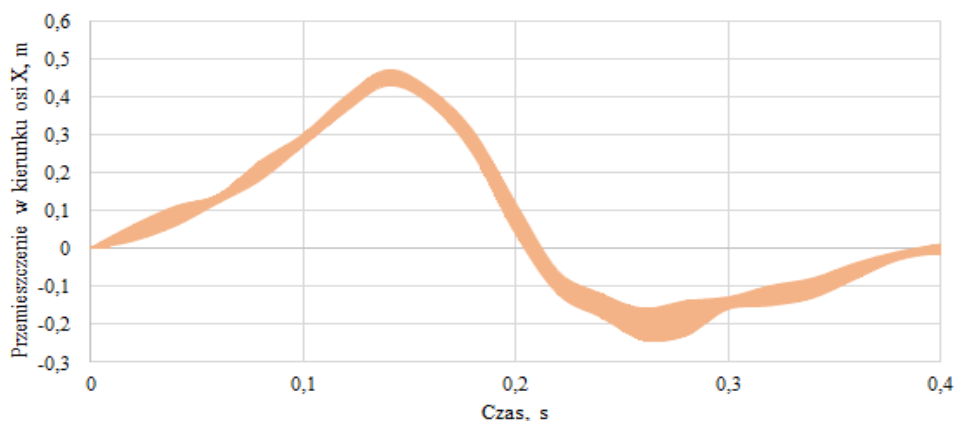


metrach (od -0,2 do 0,6 m). Krzywa na wykresie (niebieska linia) pokazuje początkowy wzrost przemieszczenia do przodu, osiągnięcie maksymalnego wychylenia, a następnie spadek do wartości ujemnych (wychylenie do tyłu) oraz stabilizację w końcowej fazie testu.]



**Rys. 7.** Przemieszczenie głowy mężczyzn C50 w kierunku osi X, podczas testu zderzeniowego.

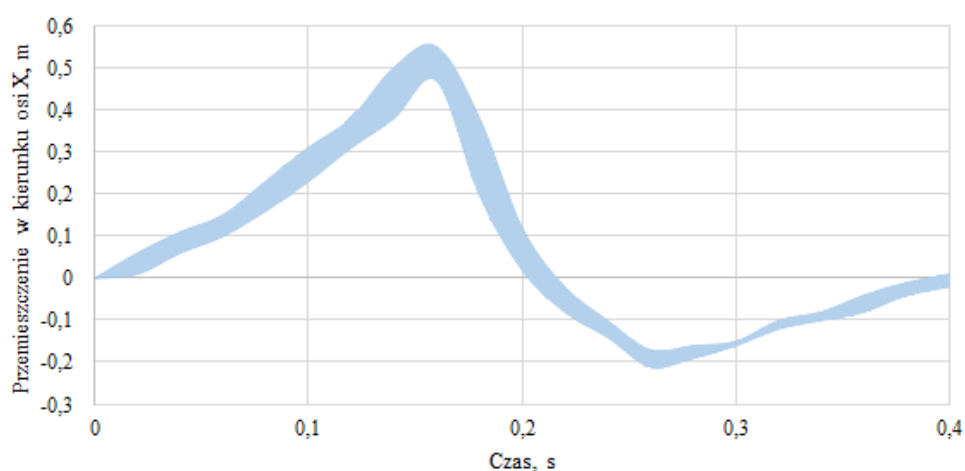
[Tekst alternatywny: Wykres 8 przedstawia przemieszczenie głowy kobiet w punkcie C50 w kierunku osi X podczas testu zderzeniowego. Oś pozioma (X) przedstawia czas w sekundach (od 0 do 0,4 s), a oś pionowa (Y) przemieszczenie w metrach (od -0,2 do 0,6 m). Czerwona krzywa obrazuje zmiany przemieszczenia, pokazując początkowy wzrost do przodu, osiągnięcie maksymalnego wychylenia, a następnie spadek do wartości ujemnych (wychylenie do tyłu) i stabilizację w końcowej fazie.]



**Rys. 8.** Przemieszczenie głowy kobiet C50, w kierunku osi X, podczas testu zderzeniowego.

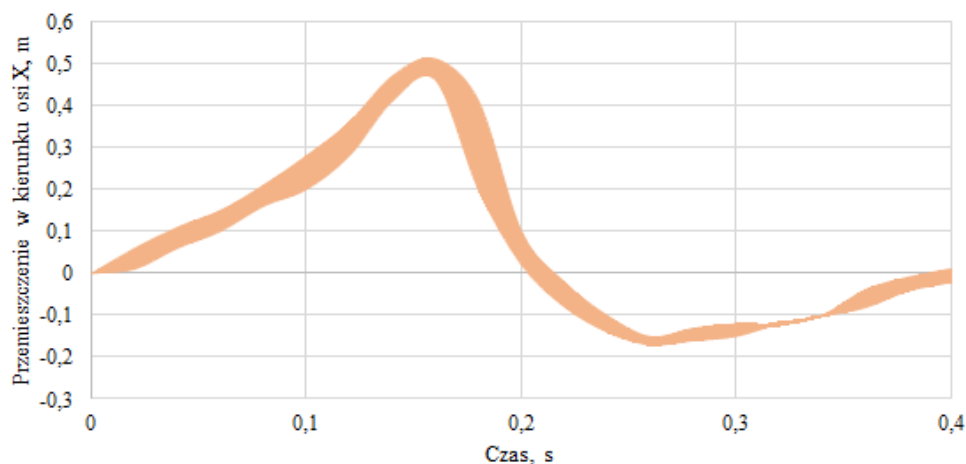


[Tekst alternatywny: Wykres 9 przedstawia przemieszczenie głowy mężczyzn w punkcie C95 w kierunku osi X podczas testu zderzeniowego. Oś pozioma (X) obrazuje czas w sekundach (od 0 do 0,4 s), a oś pionowa (Y) przemieszczenie w metrach (od -0,2 do 0,6 m). Niebieska krzywa obrazuje zmiany przemieszczenia, pokazując początkowy wzrost do przodu, osiągnięcie maksymalnego wychylenia, a następnie spadek do wartości ujemnych (wychylenie do tyłu) oraz stabilizację w końcowej fazie.]



**Rys. 9.** Przemieszczenie głowy mężczyzn C95 w kierunku osi X, podczas testu zderzeniowego.

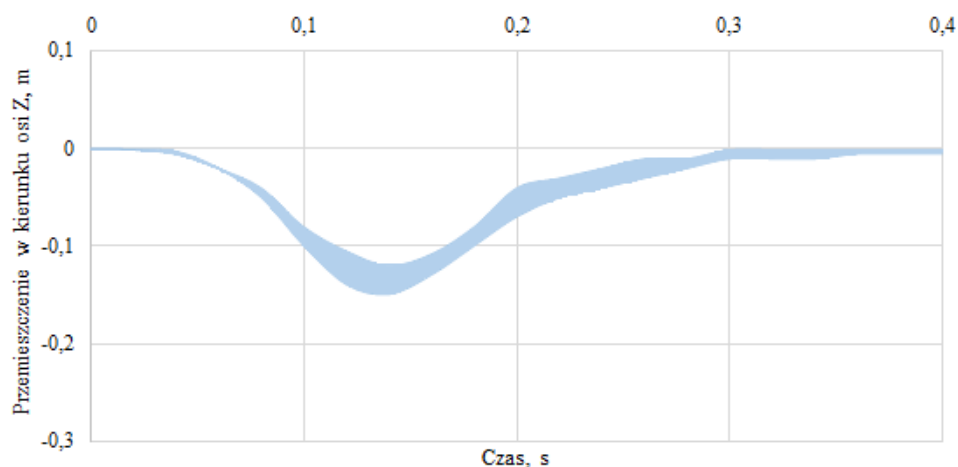
[Tekst alternatywny: Wykres 10 przedstawia przemieszczenie głowy kobiet w punkcie C95 w kierunku osi X podczas testu zderzeniowego. Oś pozioma (X) pokazuje czas w sekundach (od 0 do 0,4 s), a oś pionowa (Y) przemieszczenie w metrach (od -0,2 do 0,6 m). Czerwona krzywa ilustruje zmiany przemieszczenia, wskazując początkowy wzrost do przodu, osiągnięcie maksymalnego wychylenia, spadek do wartości ujemnych (wychylenie do tyłu) oraz stabilizację w końcowej fazie testu.]



**Rys. 10.** Przeszczenie głowy kobiet C95, w kierunku osi X, podczas testu zderzeniowego.

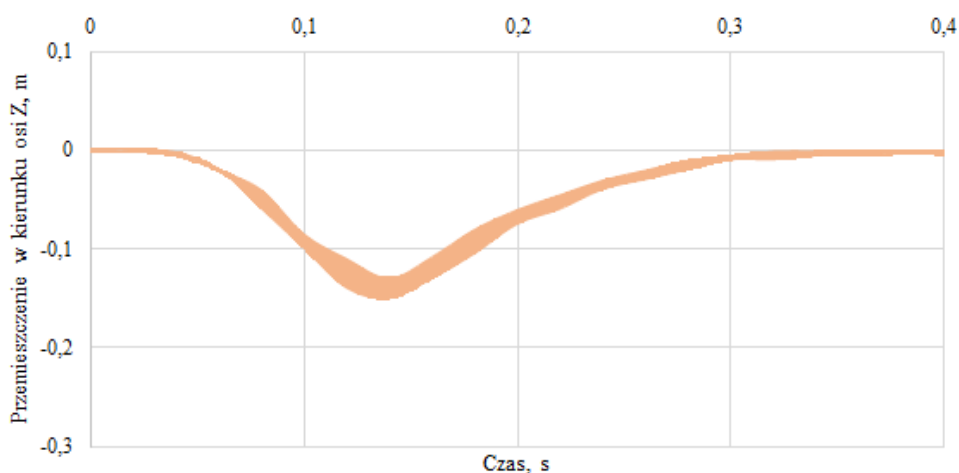
Przeszczenia głowy ochotników w realizowanych testach zderzeniowych względem osi Z zostały przedstawione na rysunkach od 11 do 16. Przeszczenie głowy ochotników mężczyzn C5 w pierwszej fazie zderzenia (0,14s – maksymalne wychylenie głowy do przodu) znajduje się w przedziale od 0,12 m do 0,15 m. Przeszczenie głowy ochotników kobiet C5 w pierwszej fazie zderzenia (0,14s – maksymalne wychylenie głowy do przodu) znajduje się w przedziale od 0,13 m do 0,15 m. Przeszczenie głowy ochotników mężczyzn C50 w pierwszej fazie zderzenia (0,14s – maksymalne wychylenie głowy do przodu) znajduje się w przedziale od 0,20 m do 0,24 m. Przeszczenie głowy ochotników kobiet C05 w pierwszej fazie zderzenia (0,14s – maksymalne wychylenie głowy do przodu) znajduje się w przedziale od 0,19 m do 0,22 m. Przeszczenie głowy ochotników mężczyzn C95 w pierwszej fazie zderzenia (0,14s – maksymalne wychylenie głowy do przodu) znajduje się w przedziale od 0,22 m do 0,25 m. Przeszczenie głowy ochotników kobiet C95 w pierwszej fazie zderzenia (0,14s – maksymalne wychylenie głowy do przodu) znajduje się w przedziale od 0,20 m do 0,25 m. Należy zauważyć, że przeszczenie głowy w drugiej fazie zderzenia (0,26 s) mieściło się w przedziale od 0,01 m do 0,04 m dla wszystkich ochotników.

[Tekst alternatywny: Wykres 11 przedstawia przeszczenie głowy mężczyzn w punkcie C5 w kierunku osi Z podczas testu zderzeniowego. Oś pozioma (X) ilustruje czas w sekundach (od 0 do 0,4 s), a oś pionowa (Y) przeszczenie w metrach (od -0,3 do 0,1 m). Niebieska krzywa pokazuje początkowe wychylenie głowy do tyłu, osiągnięcie maksymalnego wychylenia w kierunku ujemnym, a następnie powrót i stabilizację w końcowej fazie testu.]



**Rys. 11.** Przemieszczenie głowy mężczyzn C5 w kierunku osi Z, podczas testu zderzeniowego.

[Tekst alternatywny: Wykres 12 przedstawia przemieszczenie głowy kobiet w punkcie C5 w kierunku osi Z podczas testu zderzeniowego. Oś pozioma (X) obrazuje czas w sekundach (od 0 do 0,4 s), a oś pionowa (Y) przemieszczenie w metrach (od -0,3 do 0,1 m). Czerwona krzywa pokazuje początkowe wychylenie głowy do tyłu, osiągnięcie maksymalnego wychylenia w kierunku ujemnym, a następnie powrót do pozycji neutralnej i stabilizację w końcowej fazie testu.]

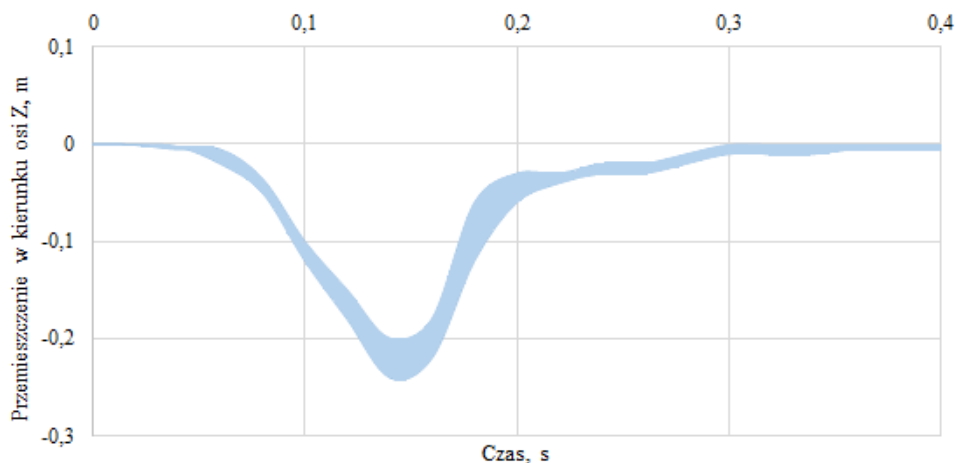


**Rys. 12.** Przemieszczenie głowy kobiet C5, w kierunku osi Z, podczas testu zderzeniowego.

[Tekst alternatywny: Wykres 13 przedstawia przemieszczenie głowy mężczyzn w punkcie C50 w kierunku osi Z podczas testu zderzeniowego. Oś pozioma (X)

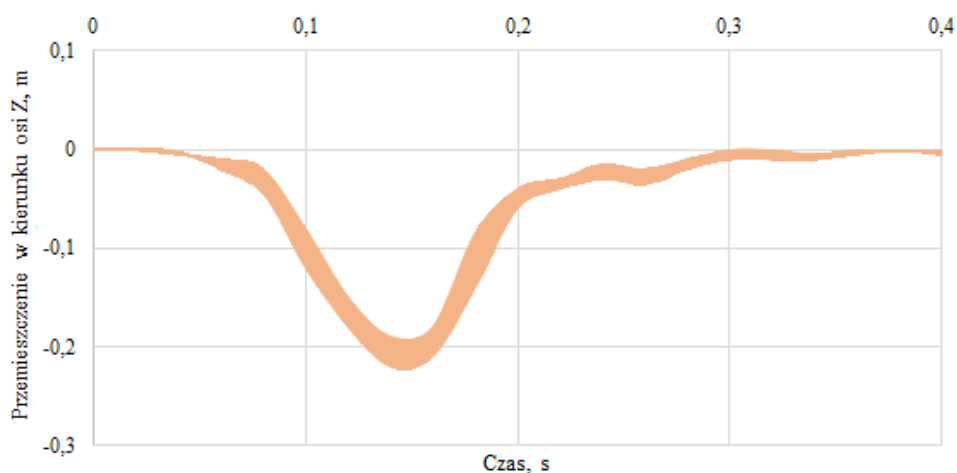


ilustruje czas w sekundach (od 0 do 0,4 s), a oś pionowa (Y) przemieszczenie w metrach (od -0,3 do 0,1 m). Niebieska krzywa pokazuje początkowe wychylenie głowy do tyłu, osiągnięcie maksymalnego wychylenia w kierunku ujemnym, a następnie powrót do pozycji neutralnej i stabilizację w końcowej fazie testu.]



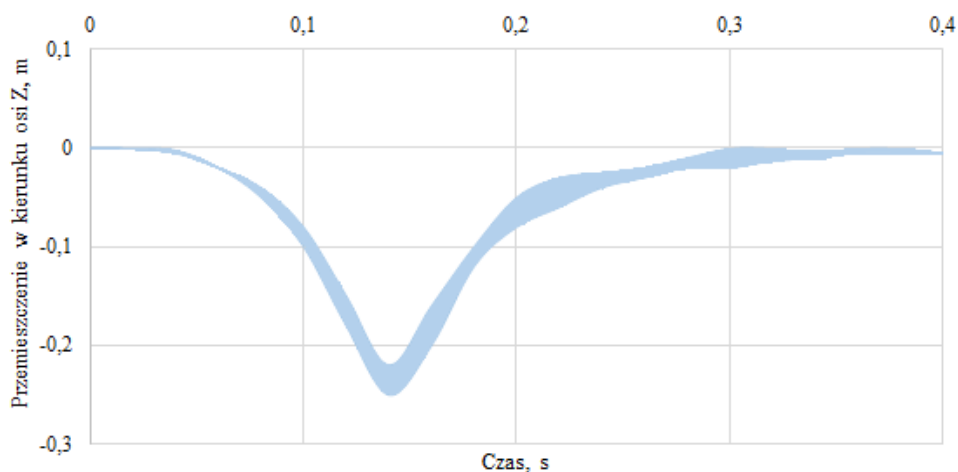
**Rys. 13.** Przemieszczenie głowy mężczyzn C50 w kierunku osi Z, podczas testu zderzeniowego.

[Tekst alternatywny: Wykres 14 przedstawia przemieszczenie głowy kobiet w punkcie C50 w kierunku osi Z podczas testu zderzeniowego. Oś pozioma (X) pokazuje czas w sekundach (od 0 do 0,4 s), a oś pionowa (Y) przemieszczenie w metrach (od -0,3 do 0,1 m). Czerwona krzywa ilustruje początkowe wychylenie głowy do tyłu, osiągnięcie maksymalnego wychylenia w kierunku ujemnym, a następnie powrót do pozycji neutralnej i stabilizację w końcowej fazie testu.]



**Rys. 14.** Przemieszczenie głowy kobiet C50, w kierunku osi Z, podczas testu zderzeniowego.

[Tekst alternatywny: Wykres 15 przedstawia przemieszczenie głowy mężczyzn w punkcie C95 w kierunku osi Z podczas testu zderzeniowego. Oś pozioma (X) ilustruje czas w sekundach (od 0 do 0,4 s), a oś pionowa (Y) przemieszczenie w metrach (od -0,3 do 0,1 m). Niebieska krzywa pokazuje początkowe wychylenie głowy do tyłu, osiągnięcie maksymalnego wychylenia w kierunku ujemnym, a następnie powrót do pozycji neutralnej i stabilizację w końcowej fazie testu.]

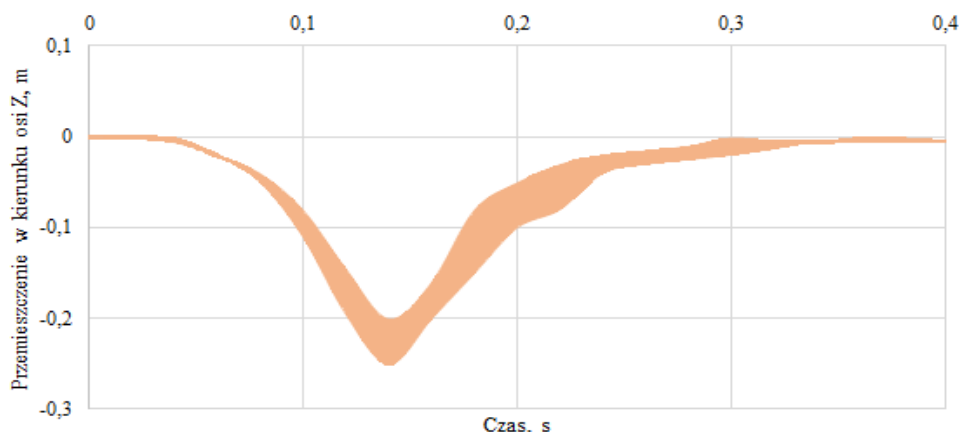


**Rys. 15.** Przemieszczenie głowy mężczyzn C95 w kierunku osi Z, podczas testu zderzeniowego.

[Tekst alternatywny: Wykres przedstawia przemieszczenie głowy kobiet w punkcie C95 w kierunku osi Z podczas testu zderzeniowego. Oś pozioma (X) obrazuje czas w sekundach (od 0 do 0,4 s), a oś pionowa (Y) przemieszczenie w metrach (od -



0,3 do 0,1 m). Czerwona krzywa ilustruje początkowe wychylenie głowy do tyłu, osiągnięcie maksymalnego wychylenia w kierunku ujemnym, a następnie powrót do pozycji neutralnej i stabilizację w końcowej fazie testu.]



**Rys. 16.** Przemieszczenie głowy kobiet C95, w kierunku osi Z, podczas testu zderzeniowego.

Na podstawie przemieszczeń głowy badanych ochotników (w pierwszej i drugiej fazie zderzenia) zarówno w kierunku osi X jak i Z można zauważyć, iż pomiędzy kobietami a mężczyznami w danej populacji centylowej występują różnice do 5 %. Różnica ta została obliczona na podstawie odchylenia standardowego wyznaczonego dla każdej pary danych w określonym przedziale czasu (od 0,00 s do 0,40 s) na następnie została uśredniona i przedstawiona jako wartość procentowa.

## 6. Literatura

- [1]. EC-TC, dostępny w: <https://ec-tc.pl> (dostęp: 10.09.2024).
- [2]. Frej, D. (2023). Analysis of Head Displacement during a Frontal Collision at a Speed of 20 km/h—Experimental Studies. *Sustainability*, 15(22), 16015. <https://doi.org/10.3390/su152216015>
- [3]. Frej, D. (2024). The Effect of Changing the Angle of the Passenger Car Seat Backrest on the Head Trajectories of the 50th Percentile Male Dummy. *Sensors*, 24(12), 3868. <https://doi.org/10.3390/s24123868>
- [4]. Gomółka, Z., Twaróg, B., Żesławska, E., Drałus, G. (2017). Rejestracja i analiza zjawisk szybkozmiennych. *Acta Scientifica Academiae Ostroviensis. Sectio A, Nauki Humanistyczne, Społeczne i Techniczne*, 10(2)/2017, 160–172.
- [5]. Poliak, M., Frej, D., Jaśkiewicz, M., Caban, J., Górniak, A., Gidlewski, M., Hajduk, I.E., Kubiak, P., Tarnapowicz, D. (2024). Analysis of Head Movement



- in KPSIT Dummies and the Impact of Seats and Seat Belts during Low-Speed Collisions 20 km/h. *Sensors*, 24(17), 5714. <https://doi.org/10.3390/s24175714>
- [6]. SkyFi, Analiza ruchu – przegląd systemów, dostępny w: [https://www.skyfi.pl/2022/11/22/analiza-ruchu-przeglad-systemow/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.skyfi.pl/2022/11/22/analiza-ruchu-przeglad-systemow/?utm_source=chatgpt.com) (dostęp: 10.09.2024).
- [7]. SkyFi, Wady i zalety systemów do analizy ruchu, dostępny w: [https://www.skyfi.pl/2023/01/25/wady-i-zalety-systemow-do-analizy-ruchu/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.skyfi.pl/2023/01/25/wady-i-zalety-systemow-do-analizy-ruchu/?utm_source=chatgpt.com) (dostęp: 10.09.2024).
- [8]. Zaborska, K., Jochymczyk-Woźniak, K., Wodarski, P., Bieniek, A. (2015). Porównanie systemów przestrzennej analizy ruchu na przykładzie systemów optycznych i akcelerometrycznych. *Aktualne Problemy Biomechaniki*, 9, 129–134.

