

INSTYTUT MECHANIKI TEORETYCZNEJ I STOSOWANEJ

Wydział Mechaniczny - Technologiczny

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Rozprawa doktorska

WPLYW PARAMETRÓW MASOWYCH SŁUPA OŚWIETLENIOWEGO
NA WARTOŚĆ WSPÓŁCZYNNIKÓW BEZPIECZEŃSTWA BIERNEGO
POJAZDÓW W TRAKCIE ZDERZENIA

mgr inż. Wojciech Danek

Promotor: dr hab. inż. Damian Gąsiorek, prof. PŚ

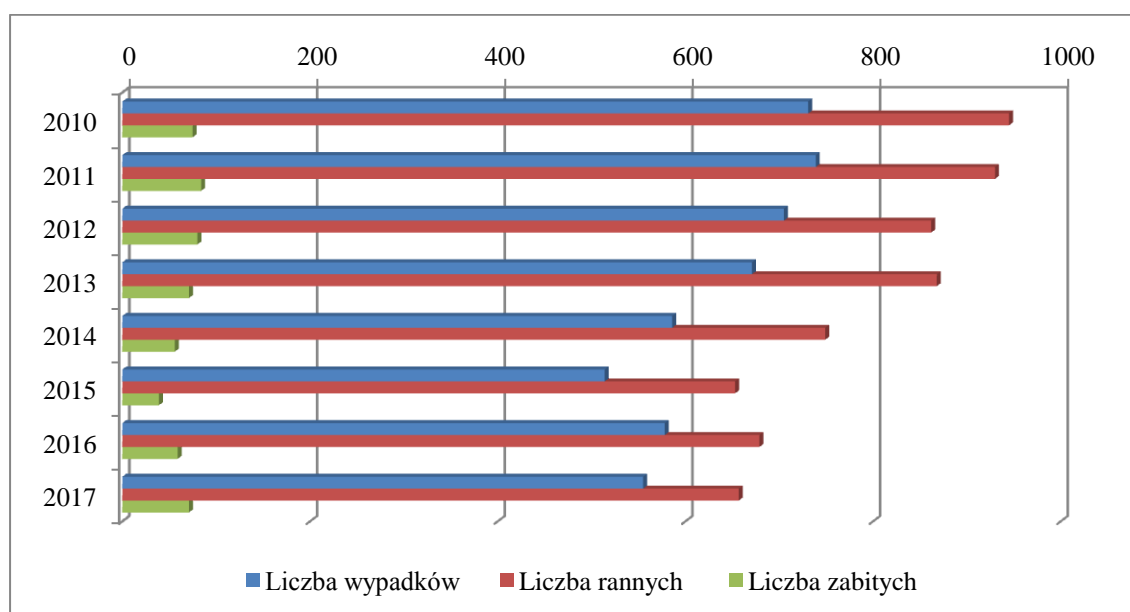
GLIWICE 2019

1. Wstęp	5
2. Przegląd literatury.....	8
2.1. Ujęcie normowe dotyczące badań zderzeniowych słupów oświetleniowych.....	8
2.1.1. Norma PN-EN 40	8
2.1.2. Norma PN-EN 1317	8
2.1.3. Norma PN-EN 12767	14
2.2. Przegląd pozycji literaturowych dotyczących modelowania, badań doświadczalnych oraz weryfikacji modeli przy zderzeniu pojazdu ze słupem oświetleniowym	18
3. Cel i zakres pracy	23
4. Opis badanego obiektu.....	25
5. Identyfikacja parametrów modeli materiałowych komponentów układu	27
5.1. Badania doświadczalne materiału kompozytowego	27
5.2. Model materiału kompozytowego w środowisku LS Dyna	32
5.3. Model gruntu w środowisku LS Dyna	34
5.4. Model materiału sprężysto-plastycznego	38
6. Symulacje numeryczne zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym	41
6.1. Wyniki dla zderzenia przy prędkości 50 km/h.....	45
6.2. Wyniki dla zderzenia przy prędkości 35 km/h.....	54
7. Wpływ grubości słupa oświetleniowego na wartość współczynników bezpieczeństwa biernego	61
7.1. Określenie minimalnej grubości ścianki słupa oświetleniowego.....	61
7.2. Wpływ grubości ścianki kompozytowego słupa oświetleniowego na wartości współczynników bezpieczeństwa biernego ASI i THIV	69
8. Wpływ położenia środka masy słupa oświetleniowego na wartość współczynników bezpieczeństwa biernego ASI i THIV	83
8.1. Badania modelowe	83
8.2. Optymalizacja położenia środka masy.....	94

9. Podsumowanie i wnioski	106
Bibliografia	111
Streszczenie.....	121
Abstract.....	122

1. Wstęp

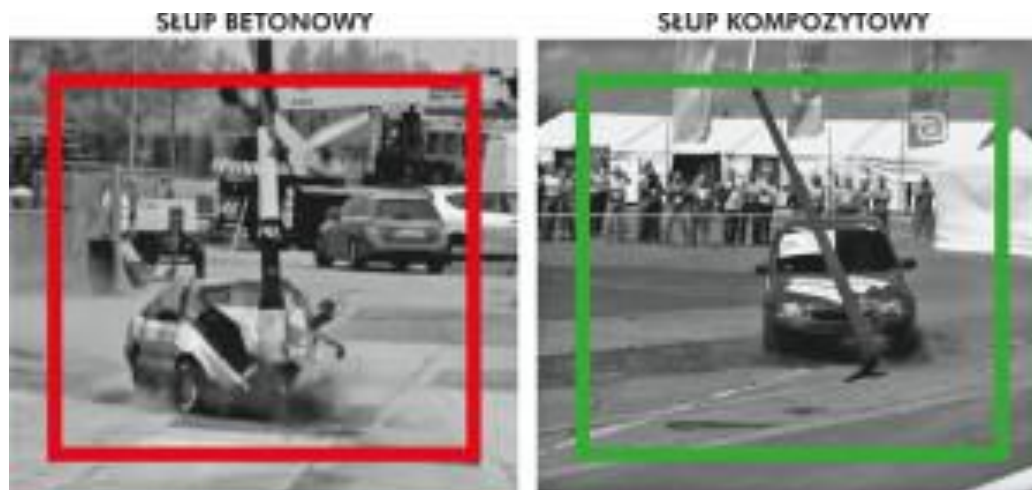
Jednym z najważniejszych zadań przy projektowaniu infrastruktury drogowej jest zapewnienie jak najwyższego poziomu bezpieczeństwa użytkownikom pojazdu. Dlatego przy projektowaniu nowych konstrukcji wsporczych, takich jak słupy oświetleniowe, bardzo dużo uwagi poświęca się aspektowi bezpieczeństwa biernego, mówiącego jakie jest ryzyko odniesienia uszczerbku na zdrowiu dla użytkowników pojazdu. Według raportów policji z lat 2010-2017 [107]], w Polsce wypadki drogowe z udziałem słupów oraz znaków stanowią około 1,5 - 2% wszystkich wypadków drogowych, w których średnio ginie 67 osób, a 793 osoby zostają ranne. Zestawienie danych uzyskanych z raportów policji odnośnie do liczby wypadków zostało przedstawione na rys. 1.



Rys. 1. Zestawienie liczby wypadków drogowych ze słupami oświetleniowymi oraz ze znakami w latach 2010-2017 [107]

Kwestia wypadków drogowych od wielu lat jest tematem dyskusji różnych instytucji zarówno krajowych, jak i międzynarodowych. Poruszają one w swoich raportach [95][96][99] przyczyny takiego stanu rzeczy i proponują działania mające na celu zredukowanie liczby ofiar śmiertelnych. Duża liczba wypadków drogowych niesie ze sobą bardzo wysokie koszty związane z hospitalizacją osób biorących udział w tym zdarzeniu oraz wymianą elementów infrastruktury drogowej, która uległa uszkodzeniu lub zniszczeniu. Ekonomiczne skutki związane z wypadkami drogowymi są szacowane na około 1-3% PKB [95], co w Polsce daje kwoty rzędu 40-60 mld PLN rocznie. Oprócz

działań prewencyjnych na szczeblu krajowym czy międzynarodowym, rośnie również świadomość obywateli, którzy dostrzegają, że każde zdarzenie drogowe wpływa negatywnie na ich zdrowie i kondycję finansową. Próbują oni zwiększać poziom swojego bezpieczeństwa poprzez stosowanie się do zaleceń ograniczenia prędkości, zapinania pasów bezpieczeństwa czy korzystania z fotelików przy przewożeniu małych dzieci. Pomimo wzrostu działań wspierających bezpieczeństwo na poziomie użytkowników pojazdów, nie są one wystarczające aby zwiększyć poziom bezpieczeństwa na poziomie globalnym. Potrzebne są zintensyfikowane działania krajów na rzecz poprawy bezpieczeństwa. Takie działania są już widoczne na drogach od wielu lat. Należą do nich m. in. stawianie słupów oświetleniowych w klasie bezpieczeństwa biernego NE i LE. Historycznie, słupy oświetleniowe były wykonywane z betonu [53]. Konstrukcje te w trakcie zderzenia z pojazdem powodowały bardzo duże zniszczenie pojazdu, co skutkowało dużą śmiertelnością osób znajdujących się w pojeździe. Dlatego konstrukcje te zaczęły być zastępowane przez słupy stalowe oraz aluminiowe. Najnowszym trendem w wytwarzaniu słupów oświetleniowych są słupy wykonane z materiałów kompozytowych. Słupy te charakteryzują się znacznie wyższym poziomem bezpieczeństwa biernego od innych konstrukcji, co można zaobserwować na podstawie analizy porównawczej zdjęć przedstawiających zderzenie pojazdu ze słupem wykonanym z betonu i słupem kompozytowym. Takie porównanie zostało przedstawione na rys. 2.



Rys. 2. Zderzenie pojazdu ze słupem oświetleniowym betonowym i kompozytowym - porównanie skutków zderzenia [94]

Istotnym zagadnieniem dotyczącym bezpieczeństwa biernego jest sposób montażu konstrukcji wsporczych. Zarówno słupy oświetleniowe, jak i inne konstrukcje wsporcze,

mogą być osadzone na betonowym fundamencie lub wkopywane bezpośrednio w podłoże. Konstrukcje osadzone na fundamencie były analizowane w pracach realizowanych przez pracowników Instytutu Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej [12][38][62][63] i są one tematem dyskusji wielu prac naukowych. Brakuje jednak badań odnośnie konstrukcji wkopywanych bezpośrednio do podłoża, co umożliwia redukcję kosztów instalacji przez brak konieczności wykonania oraz transportu ciężkiego fundamentu betonowego. Konstrukcje te umożliwiają ponadto znacznie łatwiejszą wymianę w razie zniszczenia lub modernizacji. Oprócz zalet konstrukcje te mają również wady. Jedną z nich jest możliwość korodowania fragmentu słupa znajdującego się pod ziemią. Wada ta może być niwelowana poprzez stosowanie dodatkowych mat ochronnych. Zalety słupów wkopywanych są jednak tak znaczące, że ten właśnie rodzaj konstrukcji może być dobrym odpowiednikiem konstrukcji osadzonych na fundamencie.

2. Przegląd literatury

2.1. Ujęcie normowe dotyczące badań zderzeniowych słupów oświetleniowych

Badania słupów oświetleniowych opisane są następującymi normami:

- PN - EN 40 części od 1 do 7,
- PN - EN 1317 -1,
- PN - EN 12767.

Przedstawione są w nich parametry, jakie muszą spełniać tego rodzaju konstrukcje wspanocze przed dopuszczeniem ich do użytkowania.

2.1.1. Norma PN-EN 40

W normie PN - EN 40, w części 1 i 2, przedstawione są zasady nazewnictwa dla słupów oświetleniowych oraz wymagania ogólne, jakie mają spełniać słupy oświetleniowe wraz z wymiarami. Część 3. tej normy określa zasady projektowania słupów oświetleniowych wraz ze sposobem ich weryfikacji. Proces wyznaczania obciążeń charakterystycznych i ich oddziaływanie na analizowane konstrukcje słupów oświetleniowych przedstawiono w niniejszej pracy w rozdziale 7.1. Części od 4 do 7 opisują wymagania stawiane słupom oświetleniowym wykonanym z różnego rodzaju materiałów.

2.1.2. Norma PN-EN 1317

Norma PN - EN 1317 przedstawia terminologię dotyczącą systemów ograniczających drogę oraz ogólne kryteria metod badań zderzeniowych. Przedstawione są w niej współczynniki umożliwiające określenie uciążliwości zderzenia pojazdu z elementem infrastruktury drogowej, takie jak:

- ASI (wskaźnik intensywności przyspieszenia),
- THIV (teoretyczna prędkość głowy w czasie zderzenia),
- PHD (opóźnienie głowy po zderzeniu),
- OIV (prędkość osoby znajdującej się w pojeździe w czasie zderzenia),
- ORA (spadek przyspieszenia ciała osoby znajdującej się w pojeździe),
- VCDI (wskaźnik odkształcenia kabiny pojazdu),
- VID I (wskaźnik odkształcenia wnętrza pojazdu) [75].

Przy określaniu bezpieczeństwa biernego w trakcie zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym brane pod uwagę są wyłącznie współczynniki ASI i THIV. Tylko one zostaną szczegółowo omówione w niniejszej pracy oraz zostaną przedstawione algorytmy ich wyznaczania.

Współczynnik ASI ma na celu określenie uciążliwości ruchu pojazdu wobec osób znajdujących się w pojeździe w pobliżu obranego punktu podczas zderzenia, jest wyznaczany na podstawie następującej zależności: [75].

$$ASI(t) = \left[\left(\frac{\bar{a}_x}{\hat{a}_x} \right)^2 + \left(\frac{\bar{a}_y}{\hat{a}_y} \right)^2 + \left(\frac{\bar{a}_z}{\hat{a}_z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

gdzie:

$\hat{a}_x, \hat{a}_y, \hat{a}_z$ - graniczne wartości przyspieszenia wzdłuż osi nadwozia x, y, z.

$\bar{a}_x, \bar{a}_y, \bar{a}_z$ - składowe przyspieszenia wybranego punktu P pojazdu uśrednionymi z ruchomego przedziału czasu $\delta=50\text{ms}$.

Jako graniczne wartości przyspieszeń dla pasażerów przyjmuje się:

$$\hat{a}_x = 12g, \hat{a}_y = 9g, \hat{a}_z = 10g \quad (2)$$

Wartość wyznaczonego współczynnika ASI jest wielkością bezwymiarową, która może przyjmować wyłącznie wartości dodatnie i nie powinna przekraczać 1. W razie przekroczenia tej wartości wzrasta ryzyko doznania uszczerbku na zdrowiu osoby znajdującej się wewnątrz pojazdu. Dlatego w rozważaniach odnośnie do bezpieczeństwa biernego przyjmuje się maksymalną wartość tego współczynnika uzyskaną w trakcie zderzenia.

$$ASI = \max[ASI(t)] \quad (3)$$

Algorytm wyznaczania tego współczynnika jest następujący:

- Odczytanie składowych przyspieszeń środka ciężkości pojazdu ($\bar{a}_x, \bar{a}_y, \bar{a}_z$) w jednostce wielokrotności przyspieszenia ziemskiego;
- Filtracja sygnału za pomocą filtra rekursywnego Butterwortha z częstotliwością wyłączania filtra CFR=13Hz;
- Określenie liczby próbek w uśrednionym oknie $\delta=50\text{ms}$;

- Obliczenie średniego przyspieszenia;
- Obliczenie wartości współczynnika ASI w funkcji czasu z zależności (1);
- Określenie maksymalnej wartości współczynnika ASI;

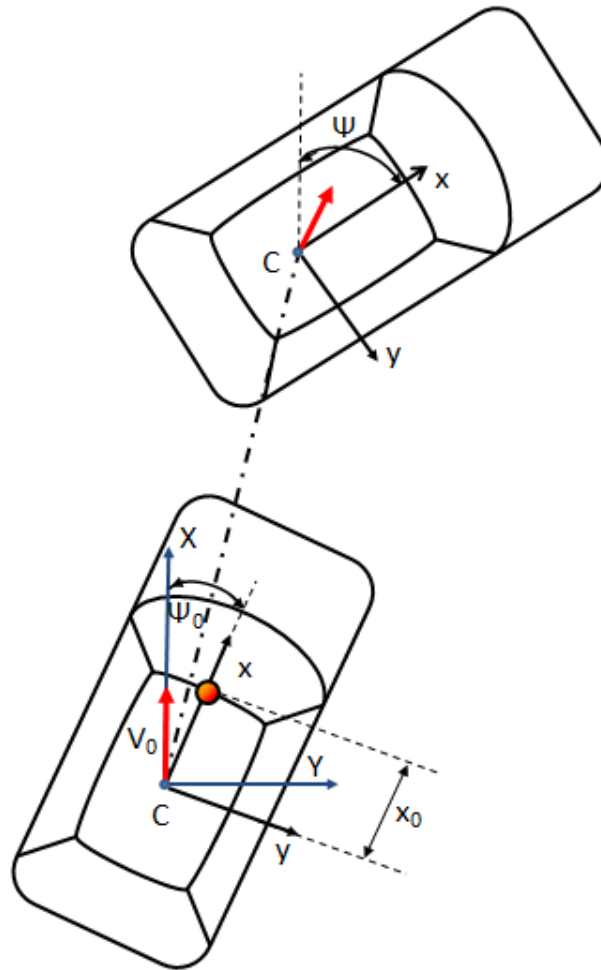
Współczynnik THIV określa teoretyczną prędkość uderzenia głowy w powierzchnię, wewnątrz pojazdu na skutek zderzenia z przeszkodą i jest określany z zależności: [75].

$$\text{THIV} = [v_x^2(T) + v_y^2(T)]^{1/2} \quad (4)$$

gdzie:

$V_x(T)$, $V_y(T)$ - prędkości teoretycznej głowy w chwili zderzenia z powierzchnią znajdującą się wewnątrz pojazdu, którą można określić mianem teoretycznej kabiny.

W celu obliczenia tego współczynnika można założyć, że na początku zetknięcia pojazdu z elementem infrastruktury drogowej zarówno pojazd, jak i teoretyczna głowa, posiadają taką samą wartość składowej poziomej prędkości V_0 . Dla uproszczenia przyjmuje się, że podczas zderzenia pojazd porusza się wyłącznie w płaszczyźnie poziomej z pominięciem obrotów wokół osi x oraz y (przechył boczny oraz ruch kołysania), które występują w trakcie rzeczywistego zderzenia. Pod rozważania brany jest jedynie obrót wokół osi z .



Rys. 3. Układy odniesienia na pojeździe i na ziemi [75]

Stosuje się dwa prawoskrętne układy współrzędnych [76]

- Układ odniesienia na pojeździe C_{xy} , którego oś x skierowana jest wzdłuż pojazdu, a oś y w jego poprzek. Środek tego układu odniesienia znajduje się w bliskim otoczeniu środka masy, lecz nie musi się z nim pokrywać. Możliwy jest obrót układu wokół osi z .
- Układ odniesienia na ziemi C_{XY} , w chwili czasu $t=0$ układ ten pokrywa się z układem odniesienia C_{xy} . Porusza się on ze stałą prędkością bez możliwości obrotu wokół jakiejkolwiek osi układu.

Pomimo że w chwili początkowej oba te układy odniesienia poruszają się z prędkością V_0 , to analiza skupia się wyłącznie na zmianach prędkości względem prędkości początkowej (wartość prędkości początkowej nie jest brana pod uwagę w trakcie obliczeń).

Opis kinematyki pojazdu oraz teoretycznej głowy zgodny z normą PN-EN 1317-1 został przedstawiony poniżej:

- Ruch pojazdu

Warunki początkowe w chwili czasu $t=0$

$$\begin{cases} X_C = 0 & Y_C = 0 & \Psi = 0 \\ V_{XC} = 0 & V_{CY} = 0 & \omega = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Kąt zmiany kursu (Ψ) można obliczyć poprzez całkowanie prędkości zmiany kursu (ω)

$$\Psi(t) = \int_0^t \omega dt \quad (6)$$

Składowe przyspieszenia pojazdu (A) w układzie odniesienia na ziemi

$$\begin{cases} A_{XC} = a_{xC} \cos\Psi - a_{yC} \sin\Psi \\ A_{YC} = a_{xC} \sin\Psi - a_{yC} \cos\Psi \end{cases} \quad (7)$$

Prędkość i położenie pojazdu:

$$\begin{cases} V_{XC} = \int_0^T A_{XC} dt \\ V_{YC} = \int_0^T A_{YC} dt \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} X_C = \int_0^T V_{XC} dt \\ Y_C = \int_0^T V_{YC} dt \end{cases} \quad (9)$$

- Ruch teoretycznej głowy względem układu odniesienia na ziemi (C_{XY})

Warunki początkowe w chwili czasu $t=0$

$$\begin{cases} X_b(0) = x_0 & Y_b = y_0 \\ V_{Xb}(0) = 0 & V_{Yb} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Kontynuowanie ruchu jednostajnego „teoretycznej” głowy można wyrazić zależnością::

$$\begin{cases} X_b = x_0 - X_C & V_{Xb} = -V_{XC} \\ Y_b = y_0 - Y_C & V_{Yb} = -V_{YC} \end{cases} \quad (11)$$

- Ruch teoretycznej głowy względem pojazdu

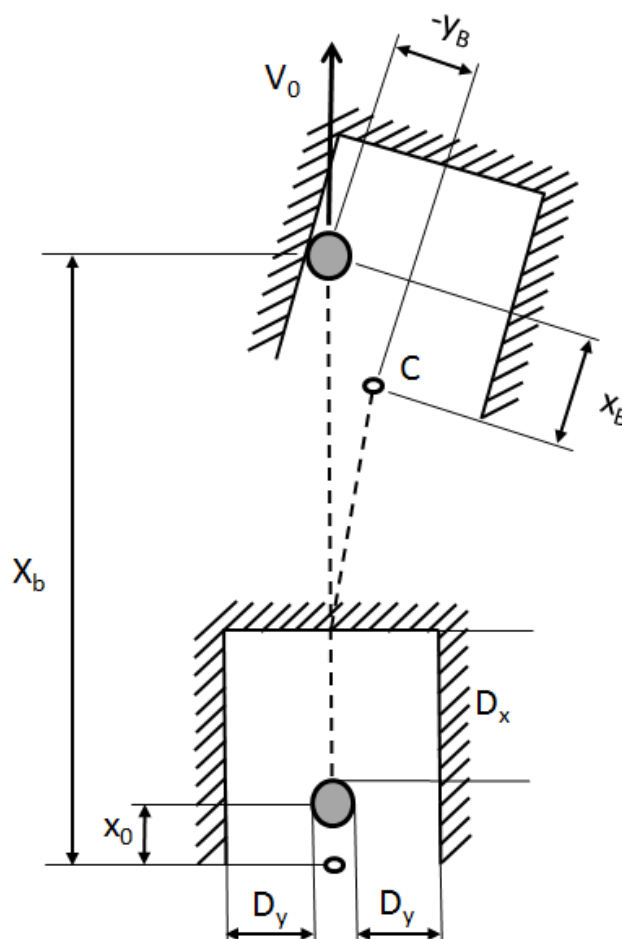
$$\begin{cases} x_b(t) = (x_0 - X_C)\cos\Psi + (y_0 - Y_C)\sin\Psi \\ y_b(t) = -(x_0 - X_C)\sin\Psi + (y_0 - Y_C)\cos\Psi \end{cases} \quad (12)$$

Składowe prędkości teoretycznej głowy względem pojazdu

$$\begin{cases} v_x(t) = -\Delta V_{XC} \cos \Psi - \Delta V_{YC} \sin \Psi + y_b \omega \\ v_y(t) = \Delta V_{XC} \sin \Psi - \Delta V_{YC} \cos \Psi - x_b \omega \end{cases} \begin{cases} X_C = \int_0^T V_{XC} dt \\ Y_C = \int_0^T V_{YC} dt \end{cases} \quad (13)$$

- Czas lotu teoretycznej głowy

W celu określenia czasu lotu teoretycznej głowy przyjmuje się założenie, że powierzchnia uderzenia (teoretyczna kabina) jest płaska oraz prostopadła do osi x i y układu odniesienia na pojeździe. Norma PN-EN 1317-1 określa, że odległość powierzchni uderzenia do początkowego położenia teoretycznej głowy wynosi D_x (odległość do przodu kabiny) oraz D_y (odległość do boków kabiny), co zostało przedstawione na rys. 4.



Rys. 4. Uderzenie teoretycznej głowy w kabinę [75]

Jako czas lotu teoretycznej głowy przyjmuje się interwał pomiędzy chwilą początkową a chwilą uderzenia w jedną z trzech powierzchni ograniczających, czyli najmniejszą wartość T , spełniającą jedno z trzech równań:

$$\begin{cases} x_b(T) = D_x + x_0 \\ y_b(T) = D_y \\ y_b(T) = -D_y \end{cases} \quad (14)$$

gdzie wartości D_x i D_y są znormalizowane oraz wynoszą kolejno 0,6m i 0,3m.

Algorytm wyznaczania tego współczynnika jest następujący:

- Odczytanie składowych przyspieszeń środka ciężkości pojazdu oraz prędkości zbaczenia z kursu;
- Scałkowanie prędkości zbaczenia z kursu w celu wyznaczenia kąta zbaczenia z kursu;
- Wyznaczenie przyspieszeń pojazdu w układzie odniesienia na ziemi z zależności (7);
- Dokonanie całkowania przyspieszenia pojazdu w układzie odniesienia ziemi;
- Obliczenie względnego położenia oraz względnej prędkości teoretycznej głowy w funkcji czasu z zależności (12) i (13);
- Znalezienie minimalnej wartości, dla której spełnione jest jedno z trzech równań przedstawionych w zależności (14);

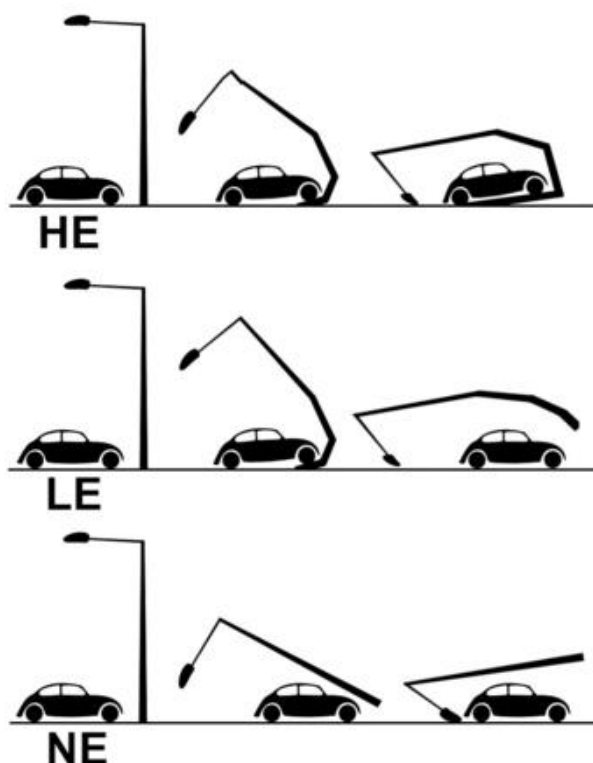
2.1.3. Norma PN-EN 12767

Norma PN - EN 12767 opisuje wymagania i metody badań bezpieczeństwa biernego konstrukcji wsporczych dla urządzeń drogowych. Wyróżnia ona trzy kategorie pochłaniania energii w odniesieniu do konstrukcji wsporczych:

- pochłaniające energię w wysokim stopniu (HE),
- pochłaniające energię w niskim stopniu (LE),
- niepochłaniające energii (NE).

Konstrukcje zakwalifikowane do klasy HE wyhamowują pojazd w znacznym stopniu i minimalizują ryzyko ponownego zderzenia z pieszymi lub z innymi elementami infrastruktury, takimi jak drzewa czy konstrukcje wsporcze.

Konstrukcje zakwalifikowane do klas LE i NE mają za zadanie zmniejszenie prędkości pojazdu przy zderzeniu i kontynuowanie jazdy przy nieznacznym ryzyku odniesienia poważnego uszczerbku na zdrowiu.



Rys. 5. Poziomy pochłaniania energii zgodnie z PN - EN 12767

Norma ta wyróżnia trzy podstawowe parametry badania konstrukcji wsporczych. Pierwszym parametrem jest klasa prędkości: określa ona na jakiego rodzaju drodze będzie znajdowała się dana konstrukcja wsporcza oraz dla jakich prędkości niezbędne jest wykonanie badań. To, w jakiej klasie prędkości dana konstrukcja ma się znaleźć, jest ustalane przez producenta.

Tabela 1. Prędkości przy zderzeniu w zależności od klasy prędkości [76]

Klasa prędkości	Prędkość przy zderzeniu [km/h]
50	35 i 50
70	35 i 70
100	35 i 100

Drugim parametrem jest kategoria pochłaniania energii, której podział został przedstawiony na początku tego rozdziału. Ostatnim podstawowym parametrem jest stopień ryzyka użytkownika pojazdu. Stopień ryzyka wyznacza się na podstawie dwóch

współczynników bezpieczeństwa biernego ASI oraz THIV, których algorytmy wyznaczania zostały przedstawione w podrozdziale 2.1.2. Poziom bezpieczeństwa użytkownika może zawierać się w przedziale od 1 do 4, gdzie poziomy od 1 do 3 określają konstrukcje zapewniające wzrost bezpieczeństwa, natomiast, poziom 4 określa konstrukcje nieszkodliwe [76]. Graniczne wartości współczynników ASI i THIV w zależności od kategorii bezpieczeństwa biernego, poziomu bezpieczeństwa oraz prędkości zderzenia zostały przedstawione w tabeli 2.

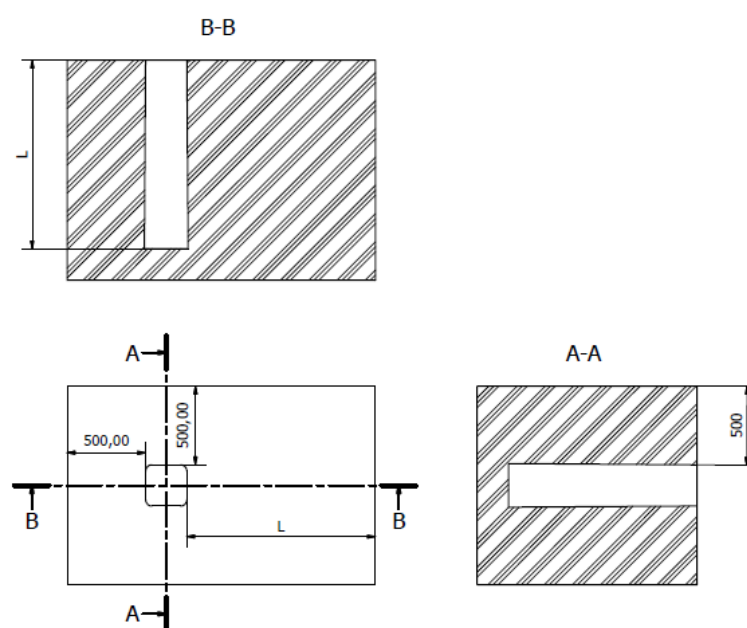
Tabela 2. Wartość współczynników ASI i THIV w zależności od klasy bezpieczeństwa biernego

Poziom pochłaniania energii	Poziom bezpieczeństwa użytkownika pojazdu	Prędkości			
		Normatywne badanie dla niskiej prędkości przy zderzeniu		Badanie klasy prędkości (50, 70, 100 [km/h]) przy zderzeniu	
		ASI		THIV km/h	
		Maksymalne wartości		Maksymalne wartości	
		ASI	THIV km/h	ASI	THIV km/h
HE	1	1	27	1,4	44
	2	1	27	1,2	33
	3	1	27	1,0	27
LE	1	1	27	1,4	44
	2	1	27	1,2	33
	3	1	27	1,0	27
NE	1	1	27	1,2	33
	2	1	27	1,0	27
	3	0,6	11	0,6	11
	4	bez wymagań	bez wymagań	bez wymagań	3

Zgodnie z normą PN-EN 12767 badania metodą próby zderzeniowej powinny odbyć się na poligonie, gdzie kąt nachylenia podłoża jest nie większy niż 2,5°. Badania powinny być przeprowadzone z użyciem standardowego samochodu osobowego, którego parametry przedstawiono poniżej:

- masa własna - $825\text{kg} \pm 40\text{kg}$,
 - masa manekina - $78\text{kg} \pm 5\text{kg}$,
 - rozstaw przedniej i tylnej osi - $1,35\text{m} \pm 0,2\text{m}$,
 - środek ciężkości na linii podłużnej (CG_x) umieszczony w odległości $0,9\text{m} \pm 0,09\text{m}$ od przodu pojazdu,
 - środek ciężkości na linii poprzecznej (CG_y) umieszczony $\pm 0,07\text{m}$ od linii środkowej podłużnej pojazdu
 - środek ciężkości (CG_z) w odległości $0,49 \pm 0,05\text{m}$ od podłoża,
 - opony powinny być napelnione powietrzem zgodnie z zaleceniami producenta.
- [76]

Montaż słupa oświetleniowego powinien być zgodny z zaleceniami producenta, natomiast minimalne wymiary zasypki przedstawiono na rys. 6.

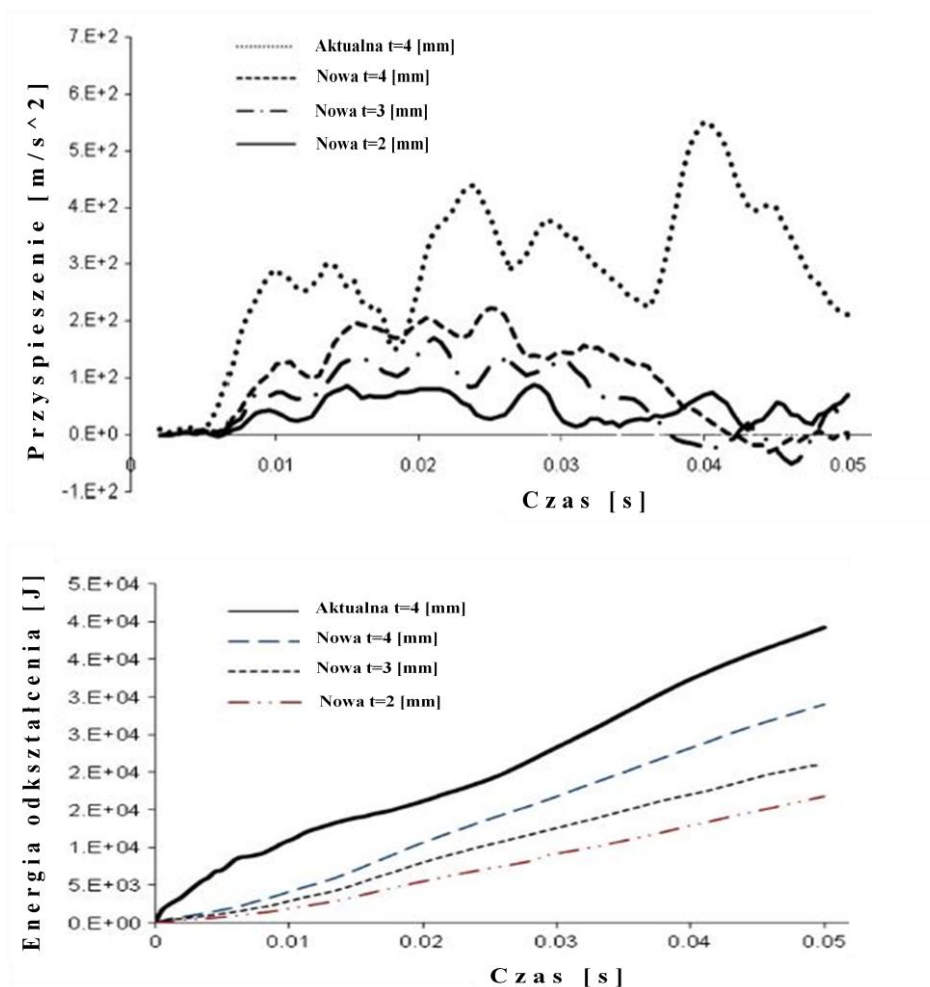


Rys. 6. Wymiary zasypki wg. PN-EN 12767

W trakcie badania punkt uderzenia powinien być umiejscowiony na środku pojazdu z dopuszczalną odchyłką równą $\pm 0,1\text{m}$, natomiast kąt uderzenia powinien wynosić $20^\circ \pm 2$, co jest określone poprzez pojazd opuszczający jezdnię.

2.2. Przegląd pozycji literaturowych dotyczących modelowania, badań doświadczalnych oraz weryfikacji modeli przy zderzeniu pojazdu ze słupem oświetleniowym

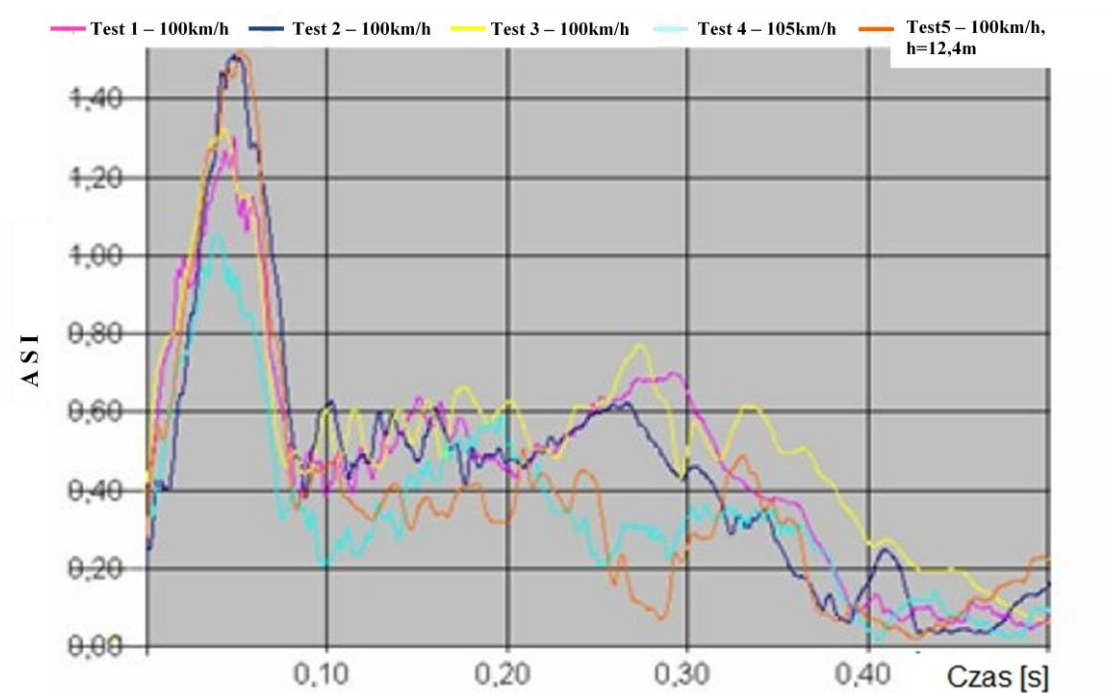
Istnieje wiele publikacji dotyczących badań zderzenia pojazdów ze słupami oświetleniowymi. W artykułach [1] i [2] autorzy przedstawili wpływ grubości słupa oświetleniowego na wartość przyspieszenia oraz stopień deformacji pojazdu w trakcie zderzenia uzyskane na podstawie wirtualnego testu zderzeniowego. Wykresy przedstawiające wyniki ilustruje rys. 7.



Rys. 7. Przyspieszenie w funkcji czasu oraz energia odkształcenia uzyskane w trakcie zderzenia z konstrukcjami o różnej grubości [1]

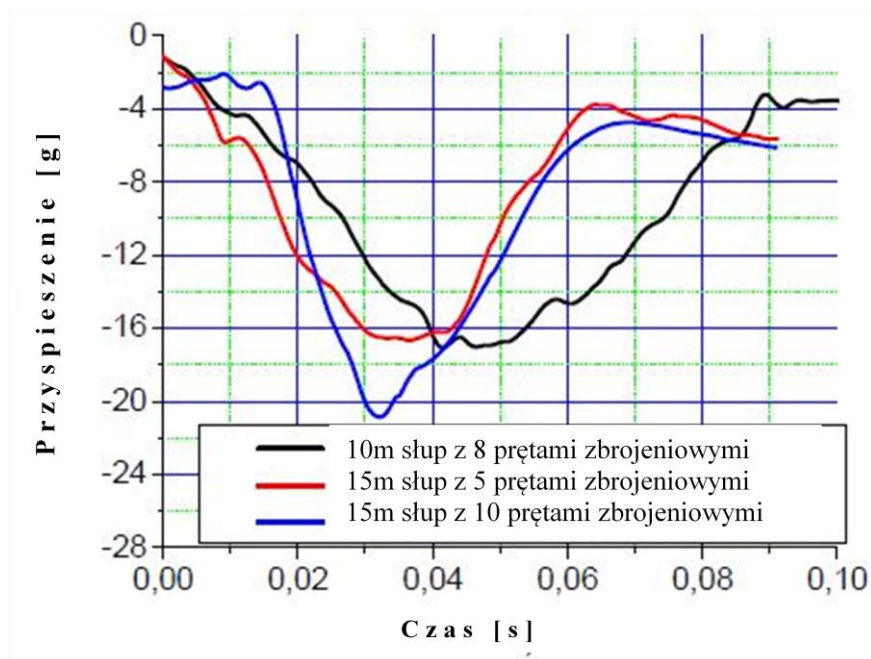
W symulacjach tych, autorzy zastosowali do dyskretyzacji modelu zarówno słupa, jak i pojazdu, elementy typu powłokowego, których łączna liczba równa była 6200. Niewielka liczba elementów skończonych spowodowana była niskim uszczegółowieniem modelu pojazdu, w którym w obszarze znajdującym się daleko od strefy zderzenia zastosowano zgrubną siatkę elementów skończonych.

Artykuł [9] przedstawia wyniki symulacji numerycznych oraz badań doświadczalnych kompozytowych słupów oświetleniowych osadzonych na fundamencie o różnych wysokościach (10 m, 12,4 m oraz 15 m). Wyniki badań doświadczalnych przedstawiono w formie współczynników bezpieczeństwa biernego ASI oraz THIV dla słupów o wymiarach 10 i 12,4 m. Zestawienie wartości współczynnika ASI, dotyczące przeprowadzonych badań doświadczalnych, przedstawiono na rys. 8.



Rys. 8. Wartości współczynnika ASI uzyskana na podstawie badań doświadczalnych [9]

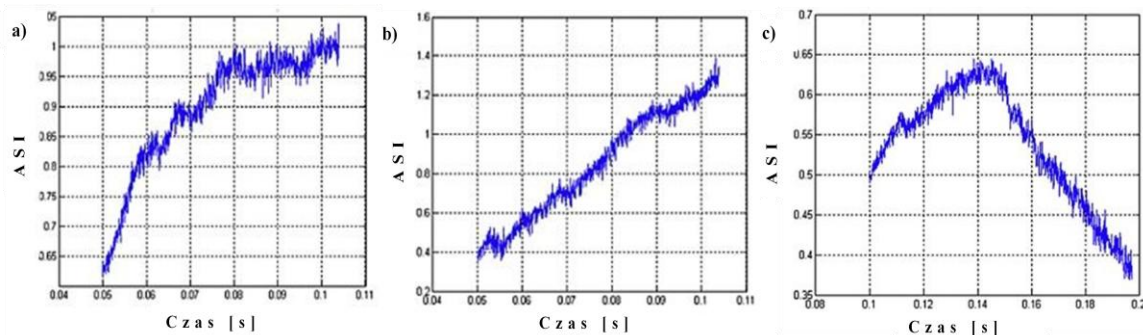
Wartość współczynnika THIV słupa o wysokości równej 10 m była równa 26 km/h, natomiast słupa 12,4 m - 32 km/h. Podczas symulacji numerycznych przedstawiono wartość przyspieszenia pojazdu w trakcie zderzenia ze słupami o różnych wysokościach montowanych na fundamencie (rys. 9.) oraz wyznaczono wartość współczynnika HIC (Head Injury Criterion).



Rys. 9. Wartości przyspieszeń uzyskane w trakcie zderzenia uzyskane na podstawie symulacji numerycznej [9]

W celu walidacji modelu obliczeniowego autorzy wykonali analizę porównawczą poszczególnych chwil zderzenia oraz porównali wartość przyspieszenia uzyskane z badań doświadczalnych i symulacji numerycznych. Model pojazdu zastosowany w trakcie testu wirtualnego zaczerpnięto z biblioteki NCAC (National Crash Analysis Center). Został on zmodyfikowany tak, aby odpowiadał modelowi zastosowanemu w trakcie badań doświadczalnych.

W pracy [63] autor przedstawia symulacje zderzenia 3 różnych pojazdów (Toyota Yaris oraz Geo Metro pobrane z biblioteki National Crash Analysis Center NCAC oraz model Geo Metro wykonany w Politecnico di Milano) ze słupem oświetleniowym osadzonym na fundamencie. Autor przedstawił wpływ położenia środka masy pojazdu na wartość współczynnika ASI oraz zachowanie się złożenia słupa oświetleniowego wraz fundamentem w trakcie zderzenia. Zestawienie wartości współczynnika ASI uzyskane dla analizowanych pojazdów przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Zestawienie wartości współczynnika ASI dla pojazdu GeoMetro oraz Toyota Yaris
 a) Geometro z wykonany w Politecnico di Milano; b) Geo Metro pobrane z biblioteki NCAC;
 c) Toyota Yaris [63]

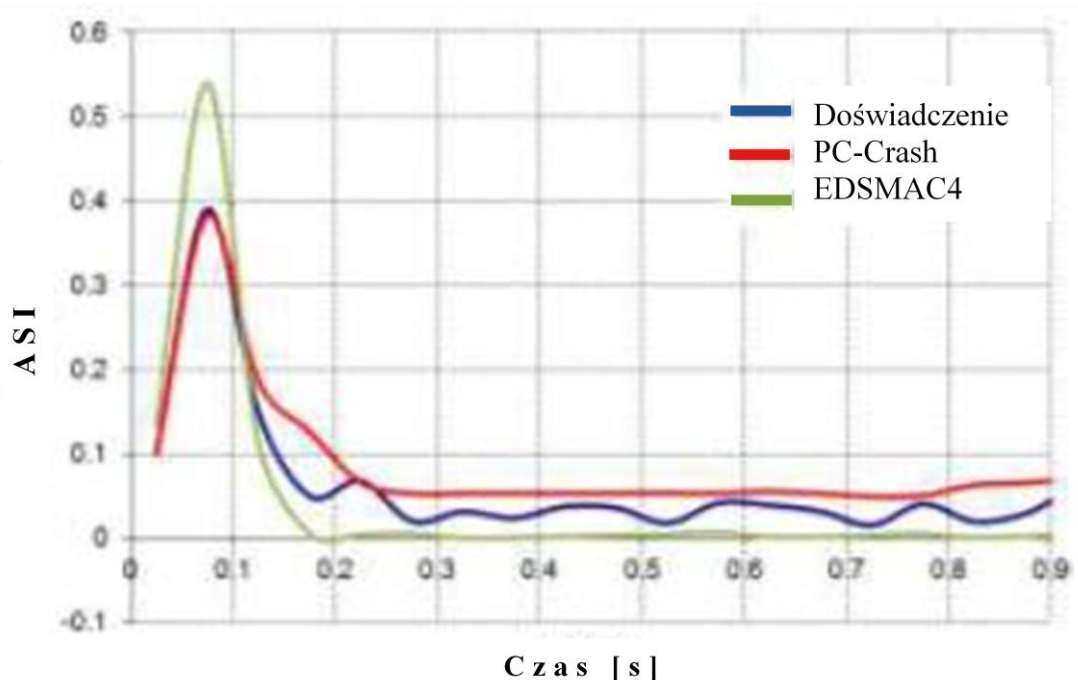
Walidacja modelu numerycznego została przedstawiona w formie porównania pojedynczej klatki zderzenia z badań doświadczalnych i symulacji.

W artykule [39] autorzy przedstawiają zmianę wartości energii kinetycznej oraz pędu w dziedzinie czasu w trakcie zderzenia pojazdu z przeszkodą w formie słupa. Do symulacji zastosowano uproszczoną, wykonaną przez autorów, konstrukcję pojazdu, składającą się z 26 elementów. Zawierała ona najbardziej istotne elementy pojazdu biorące udział w zderzeniu. Przeszkodę zamodelowano jako element nieodkształcalny, a cały model składał się z 4586 8 węzłowych izoparametrycznych elementów skończonych.

W pracy [64] autorzy przedstawiają możliwość zastosowania modeli regresji do symulacji zderzenia pojazdu ze słupem. Przedstawiono trzy modele regresji: RARMAX, ARMAX i AR. Skuteczność działania tych modeli przetestowano zarówno dla rzeczywistego zderzenia ze sztywnym stalowym słupem, jak i testu wirtualnego. Oba te testy były przeprowadzone dla pojazdu o masie 873 kg i prędkości 35km/h. Stosując symulację numeryczną, autorzy wykonali model w konwencji metody układów wieloczołnowych. Przednia część pojazdu, biorąca udział w zderzeniu, została podzielona na 6 nieodkształcalnych elementów połączonych elementami sprężysto- tłumiącymi.

Publikacja [88] przedstawia sposób wyznaczania współczynników bezpieczeństwa biernego zgodnie z PN-EN 12767 dla czterech przypadków zderzenia. Trzy przypadki dotyczą zderzenia z konstrukcjami wsporczymi (bramownice drogowe oraz słup oświetleniowy), natomiast przypadek czwarty dotyczy zderzenia dwóch pojazdów ze sobą. Autor przedstawia wyniki badań doświadczalnych realizowanych na poligonie

doświadczalnym zbudowanym przez firmę WIMED Co. w kolaboracji z Instytutem Ekspertyz Sądowych i porównuje je z wynikami testów wirtualnych realizowanych w dwóch różnych oprogramowaniach umożliwiających symulowanie zderzeń (PC-Crash i EDSMAC4). Wykres przedstawiający wartość współczynnika ASI przy zderzeniu pojazdu ze słupem oświetleniowym, uzyskano na podstawie badań doświadczalnych oraz symulacji numerycznych, przedstawiono na rys. 11.



Rys. 11. Wartość współczynnika ASI przy zderzeniu pojazdu ze słupem oświetleniowym uzyskane na podstawie badań doświadczalnych oraz symulacji numerycznych [88]

Na podstawie analizy przeglądu literatury dotyczącej badań słupów oświetleniowych można zauważyć, że brak jest badań pokazujących wpływ parametrów masowych słupa oświetleniowego na wartość współczynników bezpieczeństwa biernego. Jedynie w artykule [63] przedstawiono wpływ parametrów masowych na wartość współczynnika ASI, dotyczyły one jednak pojazdu, a nie słupa oświetleniowego. Wszystkie analizowane przez autorów konstrukcje słupów oświetleniowych osadzone są na betonowym fundamencie natomiast brak jest badań odnośnie do słupów wkopywanych w grunt.

3. Cel i zakres pracy

Celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest określenie wpływu grubości ścianki oraz położenia środka ciężkości słupa oświetleniowego na wartość współczynników bezpieczeństwa biernego w trakcie zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym. Zrealizowano go poprzez minimalizację współczynników bezpieczeństwa biernego ASI oraz THIV określanych w trakcie zderzenia pojazdu ze słupem.

Praca składa się z dwóch części: teoretycznej oraz badawczej. Część teoretyczna obejmuje przegląd literatury, w skład którego wchodzi:

- opis norm dotyczących badania konstrukcji wsporczych, jakimi są słupy oświetleniowe,
- przegląd aktualnych artykułów naukowych poruszających tematykę zderzeń pojazdów ze słupami oświetleniowymi,
- opis zastosowanych modeli materiałowych.

W części badawczej przedstawiono wyniki badań własności mechanicznych materiału kompozytowego dostarczonego przez firmę Alumast. Na podstawie tych badań wyznaczono parametry modelu materiałowego użytego w symulacjach numerycznych w środowisku LS Dyna. Testy wirtualne przeprowadzono dla dwóch różnych prędkości najazdu pojazdu: 30 km/h oraz 50 km/h. Wynikają one z założonej klasy prędkości oraz miejsca posadowienia konstrukcji wsporczej. Wyniki symulacji numerycznej zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym weryfikowano na podstawie analizy:

- jakościowej poszczególnych chwil zderzenia,
- ilościowej bazującej na porównaniu wartości współczynnika ASI.

Wyniki zastosowane do porównania uzyskano z symulacji oraz badań doświadczalnych zrealizowanych w ramach międzynarodowej konferencji "Polska wizja zero". Wyniki uzyskane na podstawie symulacji numerycznej dla słupa wykonanego z materiału kompozytowego porównano z wynikami uzyskanymi dla najczęściej stosowanego materiału na słupy oświetleniowe, jakim jest aluminium. W celu minimalizacji współczynników bezpieczeństwa biernego ASI oraz THIV zaproponowano dwa możliwe podejścia.

Pierwsze dotyczyło określenia wpływu grubości ścianki słupa na wartości tych współczynników. Minimalna grubość ścianki słupa, spełniająca kryteria wytrzymałościowe określone w polskich normach, została wyznaczona na podstawie analiz numerycznych, natomiast maksymalną określono na 10mm. Wpływ grubości ścianki słupa na wartości współczynników bezpieczeństwa biernego przedstawiono dla dwóch prędkości najazdu pojazdu: 35 km/h oraz 50km/h.

Drugie podejście dotyczyło sprawdzenia wpływu zmiany położenia środka ciężkości słupa na wartość współczynników ASI oraz THIV. Zostało to podzielone na dwa etapy. W pierwszym przeprowadzono badania doświadczalne na stanowisku opracowanym jako stanowisko badawcze w Instytucie Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej, bazującym na młocie Charpy`ego. Drugi etap dotyczył optymalizacji postaci konstrukcyjnej na podstawie wyników uzyskanych z badań doświadczalnych dla modelu słupa oświetleniowego o rzeczywistych wymiarach.

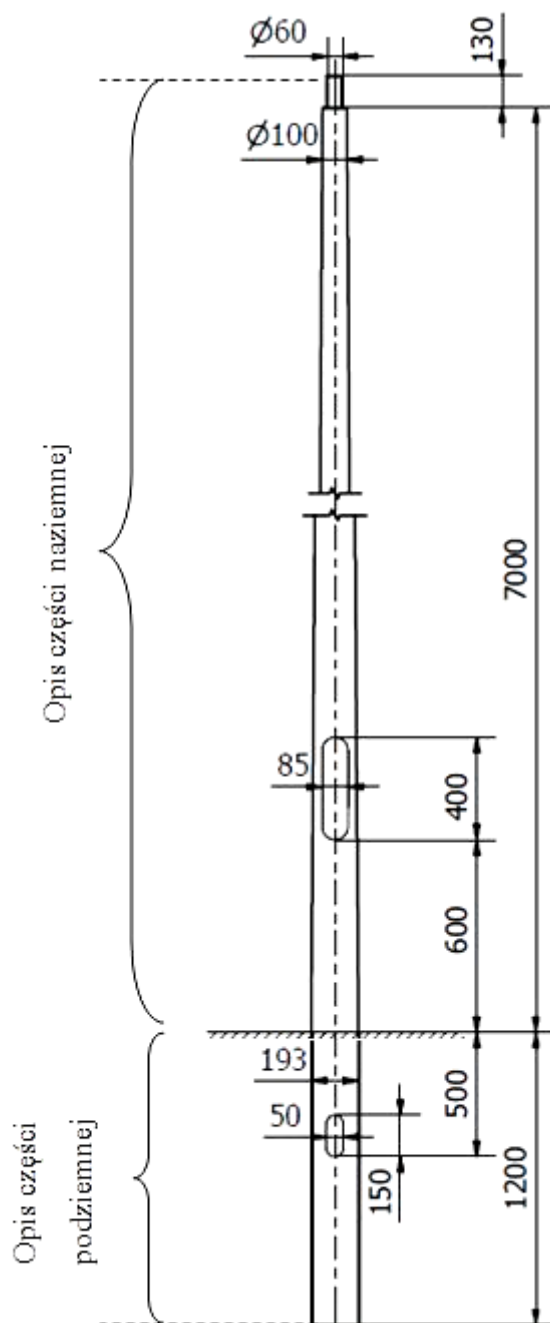
Wykorzystane oprogramowanie:

Modele fizyczne słupa oświetleniowego wraz z gruntem oraz wysięgnikiem zostały wykonane w oprogramowaniu SolidWorks. Dyskretyzację modelu fizycznego oraz nałożenie warunków początkowo - brzegowych przeprowadzono w darmowym preprocesorze LS-PrePost udostępnionym przez firmę LSTC software. Obliczenia numeryczne wykonano z zastosowaniem oprogramowania LS Dyna, natomiast do przedstawienia uzyskanych wyników wykorzystano oprogramowanie Excel oraz Matlab. Oprogramowanie Matlab posłużyło również do opracowania algorytmów umożliwiających wyznaczenie wartości współczynników bezpieczeństwa biernego ASI oraz THIV, modyfikacji plików wsadowych do oprogramowania LS Dyna, określenia wpływu grubości ścianki słupa na wartość współczynników ASI oraz THIV, jak i przeprowadzenia optymalizacji z zastosowaniem algorytmów genetycznych. Analiza stereomechaniczna słupa oświetleniowego oraz określenie minimalnej grubości ścianki słupa spełniającej wymagania wytrzymałościowe została przeprowadzona w środowisku ANSYS. Analizę filmów nagranych za pomocą szybkiej kamery przeprowadzono w oprogramowaniu TEMA Automotive.

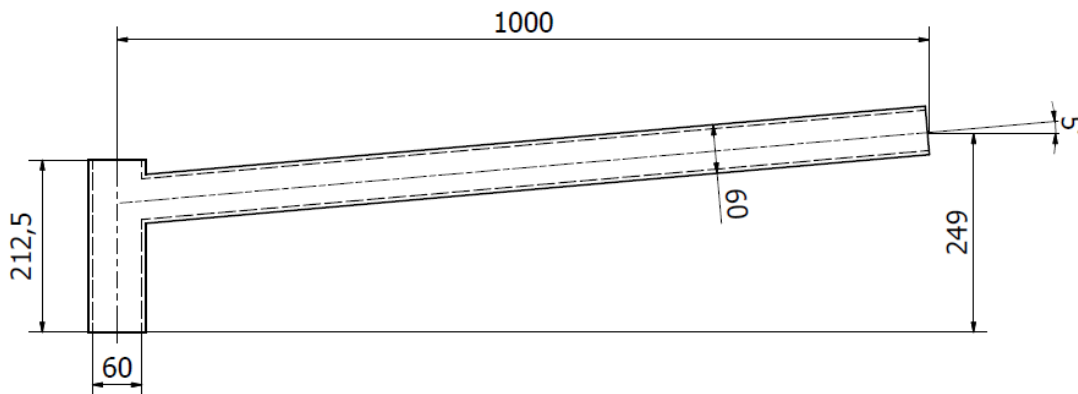
Oprogramowanie wykorzystane w trakcie realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej jest własnością Instytutu Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej.

4. Opis badanego obiektu

W pracy został wykorzystany komercyjnie stosowany słup oświetleniowy wraz z wysięgnikiem produkowany przez firmę Alumast S.A. Wymiary geometryczne słupa oraz wysięgnika przedstawiono na rys. 12. oraz rys. 13. Grubość analizowanej konstrukcji jest równa 4mm.

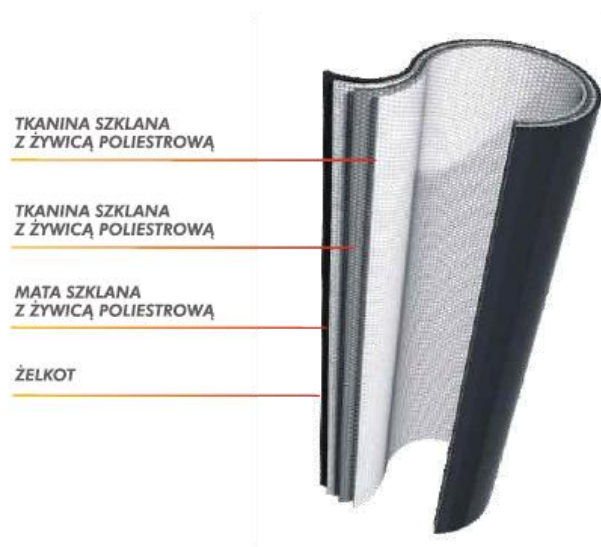


Rys. 12. Rysunek słupa oświetleniowego z naniesionymi wymiarami



Rys. 13. Rysunek wysięgnika z naniesionymi wymiarami

Konstrukcja słupa oświetleniowego umożliwia jego montaż poprzez wkopywanie w grunt na głębokość 1200mm, co zostało zaznaczone na rys. 12. W celu redukcji masy oraz obniżenia kosztów transportu słup został wykonany z materiału kompozytowego, którego strukturę przedstawiono na rys. 14.



Rys. 14. Struktura materiału kompozytowego[93]

Na podstawie informacji uzyskanych od producenta wiadomo, że słup ten został przypisany do klasy prędkości 50 oraz jest montowany na terenach wiejskich z pojedynczymi zabudowaniami rolniczymi lub drzewami (kategoria terenu II). W trakcie badań jego konstrukcja zostanie poddana zderzeniom z prędkościami 35km/h oraz 50km/h. Natomiast do obliczeń związanych z obciążeniami charakterystycznymi zostaną przyjęte współczynniki zgodne z tą kategorią terenu.

5. Identyfikacja parametrów modeli materiałowych komponentów układu

5.1. Badania doświadczalne materiału kompozytowego

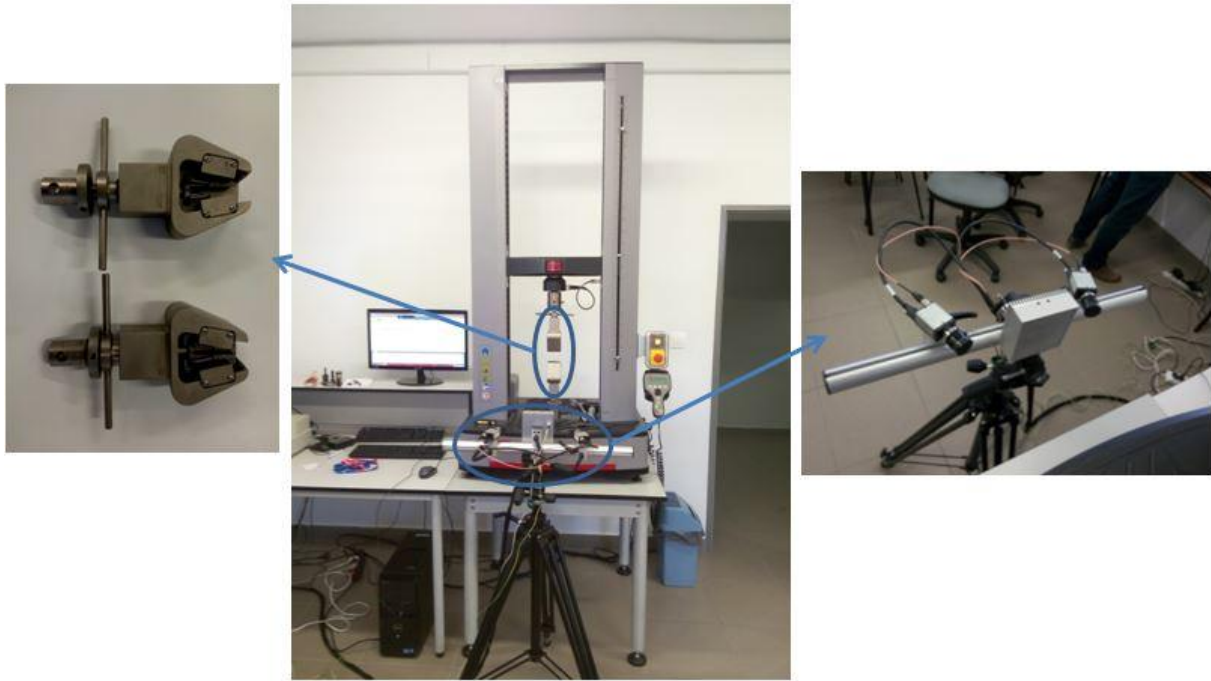
W podrozdziale tym przedstawiono badania doświadczalne polimerowego materiału kompozytowego wzmocnionego włóknem szklanym, z którego wykonywane są słupy oświetleniowe. Materiał do badań pozyskano z firmy Alumast, zajmującej się produkcją kompozytowych słupów oświetleniowych. Strukturę materiału przedstawiono na rys. 14., natomiast szczegółowy rozkład warstw w materiale jest tajemnicą handlową firmy Alumast i nie może zostać ujawniony.

W normie PN - EN 40-7 zawarte są informacje odnośnie do parametrów włókien, które są najczęściej stosowane na wzmocnienie, oraz żywic poliestrowych. Dane te nie są wystarczające do uzyskania parametrów wytrzymałościowych materiału kompozytowego. Wybrane własności włókien ze szkła typu E stosowanego na wzmocnienie oraz w pełni utwardzonej żywicy poliestrowej przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Typowe własności włókien typu E oraz w pełni utwardzonej żywicy poliestrowej

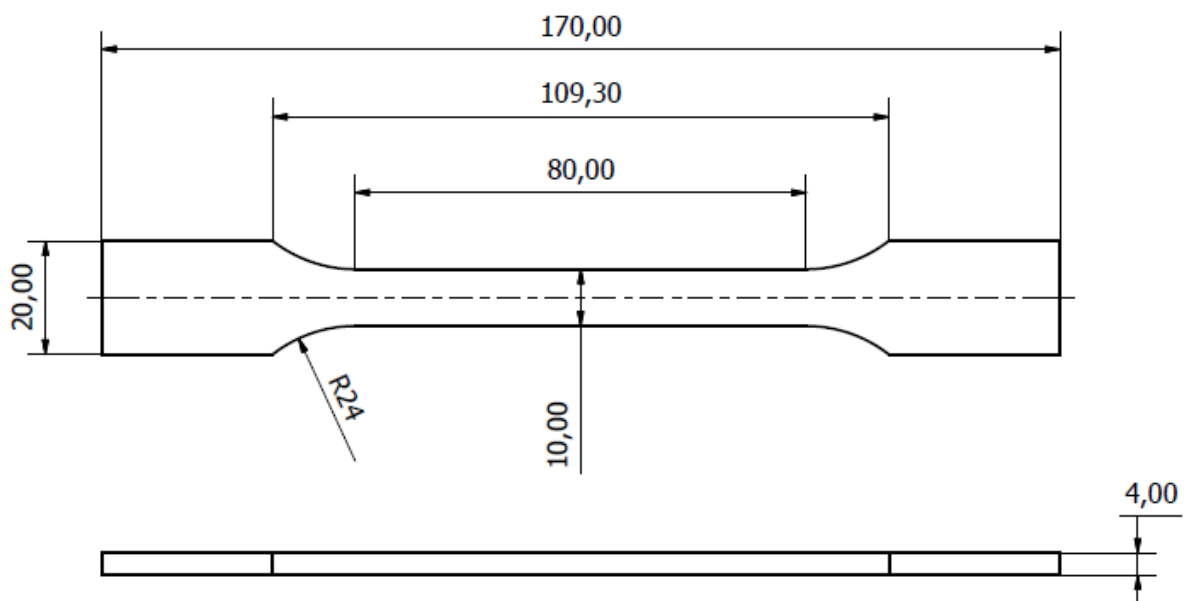
	Włókna ze szkła typu E	Utwardzona żywica poliestrowa
Moduł rozciągania [GPa]	72	3,4
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	1500	79
Wydłużenie przy zerwaniu [%]	-	3,5
Twardość wg Barcola	-	43
Temperatura odkształcenia pod obciążeniem [°C]	-	78

W celu uzyskania rzeczywistych parametrów wytrzymałościowych materiału kompozytowego wykonano badania na maszynie MTS Criterion Model 43 z komputerową rejestracją pomiaru siły i wydłużenia, umożliwiającą wykonanie badań w zakresie pomiarowym 0 - 30 kN [101]. W celu określenia odkształcenia próbek zastosowano system cyfrowej korelacji obrazu 3D (DIC - Digital Image Correlation) Dantec. System ten umożliwia bezkontaktowy pomiar przemieszczeń i odkształceń poprzez korelację obrazów cyfrowych badanego obiektu zarejestrowanych w trakcie badania [92]. Strukturę stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 15.



Rys. 15. Struktura stanowiska badawczego

Do badań zastosowano uniwersalną próbkę w formie wioselka typu A, której wymiary były zgodne z normą PN ISO 527. Grubość próbki, wynosząca 4mm, była zależna od materiału, który otrzymano do badań od producenta.



Rys. 16. Próbka do badań typ A z zaznaczonymi wymiarami

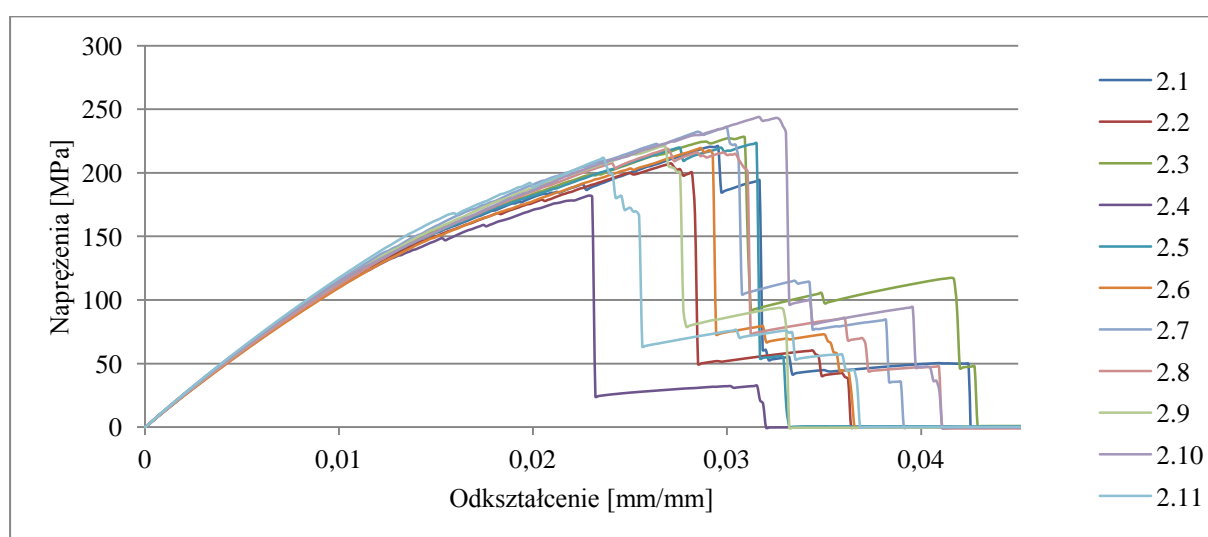
Próbki wykonano z zastosowaniem obróbki wodno-ściernej na maszynie typu Waterjet, a następnie kondycjonowano w temperaturze 23°C przez 88h. Z arkusza dostarczonego materiału wycięto próbki w trzech orientacjach, umożliwiające

wyznaczenie własności materiałowych wzdłuż kierunku włókien, w kierunku poprzecznym do kierunku włókien oraz w orientacji 45°, służącej do badania ścinania poprzez rozciąganie. Dla każdego z kierunków wykonano minimum 10 próbek. Zestawienie wykonanych próbek, które były przygotowane do badań doświadczalnych z zastosowaniem systemu cyfrowej korelacji obrazu, przedstawiono na rys. 17.

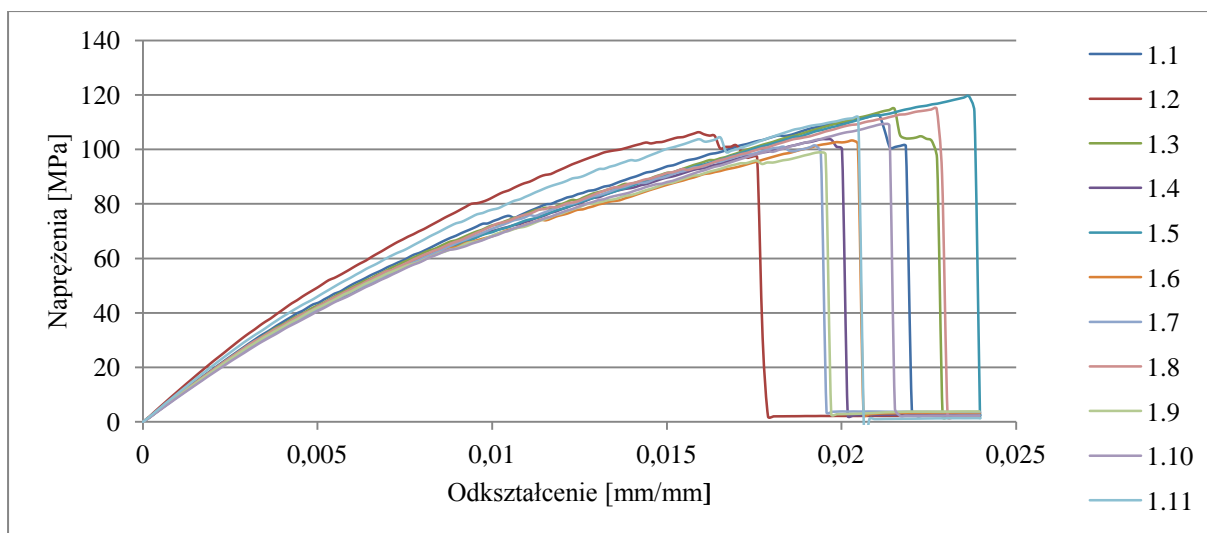


Rys. 17. Zestawienie próbek przygotowanych do badań wytrzymałościowych

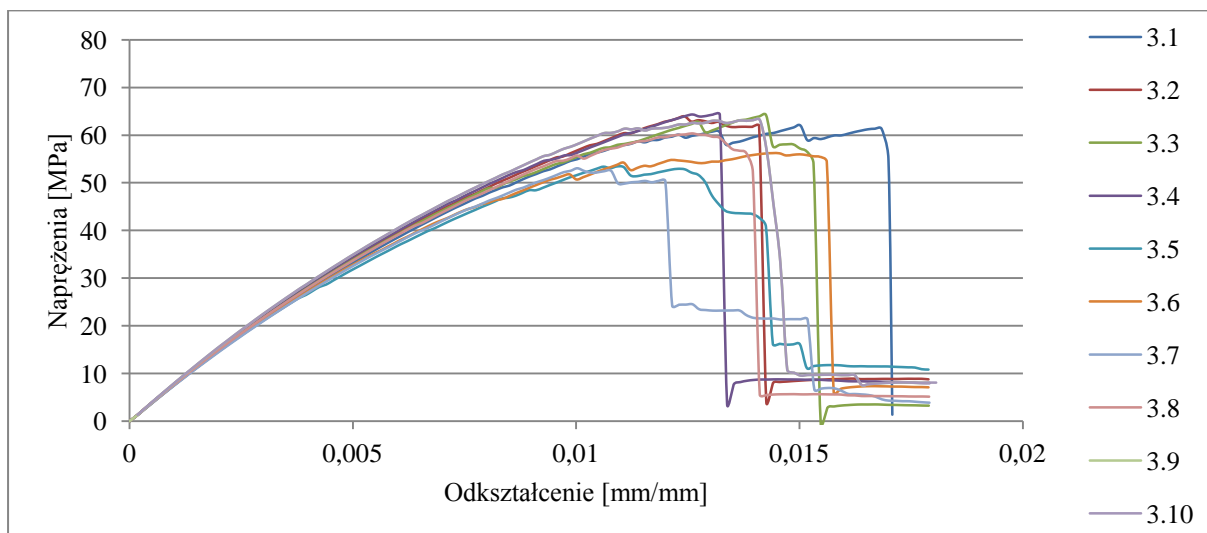
Wyniki uzyskane z badań doświadczalnych przedstawiono na rys. od 18 do 20.



Rys. 18. Napężenia w funkcji odkształcenia dla próbki o orientacji w kierunku wzdłuż włókien



Rys. 19. Napężenia w funkcji odkształcenia dla próbki o orientacji w kierunku poprzecznym do włókien

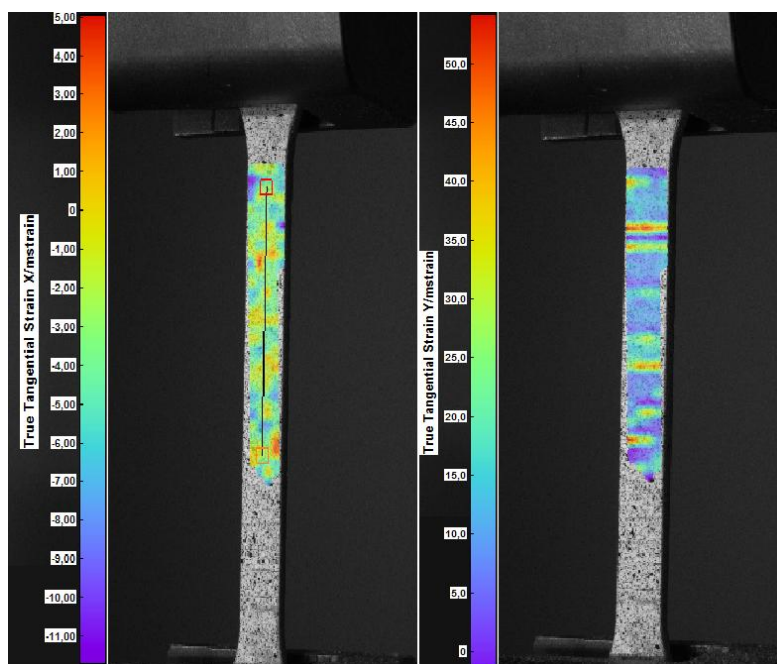


Rys. 20. Napężenia w funkcji odkształcenia dla próbki o orientacji 45° umożliwiającej badanie ścinania poprzez rozciąganie

Analizując wykresy przedstawione na Rys. 18-20 można zaobserwować dwa punkty, których następuje spadek wartości naprężenia. Spowodowane jest to, że w pierwszej fazie uszkodzeniu ulega osnowa materiału kompozytowego, natomiast naprężenie w dalszym ciągu przenoszone jest przez zbrojenie. Kolejny spadek wartości naprężenia związany jest ze zniszczeniem włókien znajdujących się we wnętrzu materiału.

Badania doświadczalne przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej umożliwiły wyznaczenie modułu sprężystości podłużnej dla kierunku wzdłuż włókien

(E_1), kierunku poprzecznym do włókien (E_2) oraz dla orientacji 45° (E_{45}). Pozwoliły również na wyznaczenie wytrzymałości na rozciąganie dla wyżej przedstawionych kierunków. Dzięki zastosowaniu systemu do cyfrowej korelacji obrazu, możliwe było określenie odkształceń występujących w trakcie badania, co pozwoliło na wyznaczenie liczby Poissona. Przykładowe mapy odkształceń dla badanych próbek przedstawiono na rys. 21.



Rys. 21. Przykładowe mapy odkształceń

Zestawienie parametrów wyznaczonych na podstawie badań doświadczalnych przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Zestawienie parametrów wyznaczonych na podstawie badań doświadczalnych

Opis próbki	Największa siła obciążająca [N]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Odkształcenie przy zerwaniu [mm/mm]	Moduł Younga [GPa]	Liczba Poissona
Próbka wycięta w kierunku wzdłuż włókien	8770,6	219,3	0,028	12,3	0,31
Próbka wycięta w kierunku prostopadłym do kierunku włókien	4347,9	108,8	0,02	9,5	0,37

Próbka wycięta w orientacji 45° do kierunku włókien	2404,7	60,1	0,013	7,6	0,27
--	--------	------	-------	-----	------

Na podstawie wyników przedstawionych w tabeli 4. można zauważyć znaczny wpływ kierunku ułożenia włókien w materiale. W próbkach wyciętych wzdłuż kierunku włókien wartość maksymalnej siły obciążającej jest ponad dwa razy większa niż w próbkach wyciętych w kierunku prostopadłym do kierunku włókien. W przypadku próbek wyciętych w orientacji 45° do kierunku włókien można zaobserwować, że maksymalna wartość siły obciążającej jest ponad trzykrotnie mniejsza niż w próbkach wyciętych wzdłuż kierunku włókien.

Dodatkowo dzięki przeprowadzeniu próby ścinania przez rozciąganie, na podstawie zależności 15 [61], możliwe było uzyskanie modułu sprężystości poprzecznej.

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}^{(2)} - \tau_{12}^{(1)}}{\gamma_{12}^{(2)} - \gamma_{12}^{(1)}} \quad (15)$$

gdzie:

$\tau_{12}^{(1)}$ - naprężenia styczne przy odkształceniu $\gamma_{12}^{(1)}$,

$\tau_{12}^{(2)}$ - naprężenia styczne przy odkształceniu $\gamma_{12}^{(2)}$.

Wartość tego modułu dla rozpatrywanego przypadku była równa 5,94 GPa.

5.2. Model materiału kompozytowego w środowisku LS Dyna

Do symulacji materiału kompozytowego, z którego wytwarzany jest słup oświetleniowy, zastosowano model materiałowy MAT_054 MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE [28]. Jest to model przeznaczony do obliczeń materiałów ortotropowych, takich jak np. laminaty warstwowe wzmocnione jednokierunkowo lub laminaty wzmocnione tkaninami.

Zależność odkształcenia do naprężenia w kierunku włókien (1), matrycy (2) oraz w płaszczyźnie laminatu (12) przyjmuje postać [89]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} &= \frac{1}{E_1}(\sigma_{11} - \nu_{12}\sigma_{22}) \\ \varepsilon_{22} &= \frac{1}{E_2}(\sigma_{22} - \nu_{21}\sigma_{11}) \\ 2\varepsilon_{12} &= \frac{1}{G_{12}}\tau_{12} + \alpha\tau_{12}^3\end{aligned}\quad (16)$$

gdzie:

$\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{12}, \sigma_{11}, \sigma_{22}, \tau_{12}$ - składowe tensora odkształcenia oraz tensora naprężenia w płaszczyźnie 12,

α - stała określająca nieliniowy wpływ naprężeń stycznych, wartość tej stałej nie jest możliwa do wyznaczenia na podstawie badań doświadczalnych, można ją określić jedynie metodą prób i błędów.

Zależność 16 ma zastosowanie wyłącznie w zakresie sprężystym.

Model ten uwzględnia kryterium zniszczenia określone w literaturze przez Chang/Chang [29], które jest następujące:

- rozciąganie włókien

$$\text{Jeżeli } \sigma_{11} > 0 \text{ to } e_f^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \beta \left(\frac{\tau_{12}}{S_c}\right) - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{element zniszczony} \\ < 0 & \text{sprężysty} \end{cases} \quad (17)$$

$$E_{11}=E_{22}=G_{12}=\nu_{21}=\nu_{12}=0$$

- Ściskanie włókien

$$\text{Jeżeli } \sigma_{11} < 0 \text{ to } e_c^2 = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{element zniszczony} \\ < 0 & \text{sprężysty} \end{cases} \quad (18)$$

$$E_{11}=\nu_{21}=\nu_{12}=0$$

- Rozciąganie laminatu

$$\text{Jeżeli } \sigma_{22} > 0 \text{ to } e_m^2 = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_c}\right) - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{zniszczony} \\ < 0 & \text{sprężysty} \end{cases} \quad (19)$$

$$E_{22}=G_{12}=\nu_{21}=0$$

- Ściskanie laminatu

$$\text{Jeżeli } \sigma_{22} < 0 \text{ to } e_d^2 = \left(\frac{\sigma_{22}}{2s_c}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2s_c}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{Y_c} + \left(\frac{\tau_{12}}{s_c}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{zniszczony} \\ < 0 & \text{sprężysty} \end{cases} \quad (20)$$

Stałe materiałowe zastosowane dla tego modelu materiałowego wynikają z danych przedstawionych w rozdziale 5.1, natomiast parametry, których nie udało się wyznaczyć, zostały przyjęte z literatury [18] dla materiału o parametrach najbardziej zbliżonych do badanego materiału.

Tabela 5. Stałe materiałowe dla materiału kompozytowego w odniesieniu do modelu *MAT_ENHANCE_COMPOSITE_DAMAGE (*MAT_054)

Oznaczenie LS Dyna	Opis	Wartość	Jednostka
RO	Gęstość materiału	1415,21	kg/m ³
EA	Moduł Young`a w kierunku włókien	12300	MPa
EB	Moduł Young`a w kierunku matrycy	9500	MPa
PRBA	Liczba Poissona w płaszczyźnie laminatu	0,31	-
GAB	Moduł Kirchhoffa w płaszczyźnie laminatu	5940	MPa
GBC	Moduł Kirchhoffa w płaszczyźnie 23	5940	MPa
GCA	Moduł Kirchhoffa w płaszczyźnie 31	5940	MPa
XC	Wytrzymałość na ściskanie w kierunku włókien	96	MPa
XT	Wytrzymałość na rozciąganie w kierunku włókien	219,3	MPa
YC	Wytrzymałość na ściskanie w kierunku matrycy	96	MPa
YT	Wytrzymałość na rozciąganie w kierunku włókien	108,8	MPa
SC	Wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie laminatu	60,1	MPa

5.3. Model gruntu w środowisku LS Dyna

Do symulacji podłoża, do którego wkopywany jest analizowany słup oświetleniowy, zastosowano model materiałowy MAT_005 MAT_SOIL_AND_FOAM. Jest to prosty model przeznaczony do symulacji pian oraz gruntu, dla których parametry materiałowe nie są wystarczająco określone. W przypadku bardzo niskiej wartości granicy plastyczności model ten zachowuje się jak ciecz. Dodatkowo, aby zapobiec przemieszczaniu się elementów pod wpływem grawitacji, powierzchnie modelu powinny być ograniczone poprzez nadanie odpowiednich warunków brzegowych.

Zależność ciśnienia od przepływu opisana jest za pomocą dewiatora tensora stanu naprężeń [28][29]:

$$\phi_s = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} - (a_0 + a_1 p + a_2 p^2) \quad (21)$$

gdzie:

$\frac{1}{2} s_{ij} s_{ij}$ - drugi niezmiennik dewiatora tensora naprężeń,

p - średnia wartość ciśnienia,

s_{ij} - dewiator tensora naprężeń,

a_0, a_1, a_2 - stałe materiałowe, które mogą być wyznaczone np. z zastosowaniem metody trójosiowego ściskania [22][23].

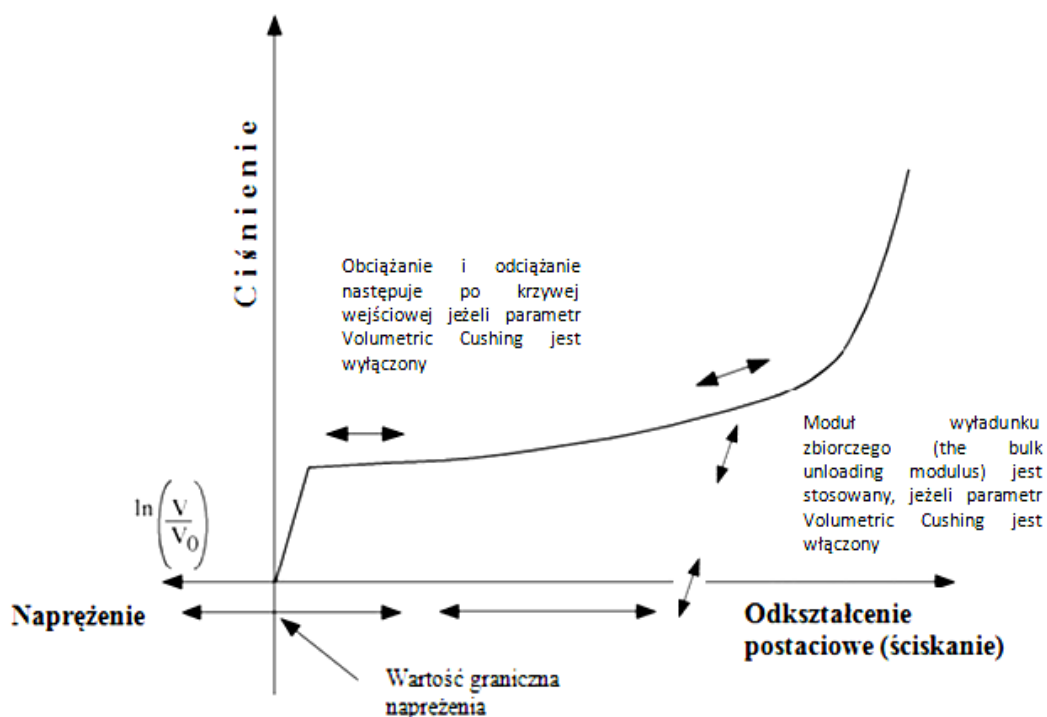
Na powierzchni plastyczności drugi niezmiennik dewiatora tensora naprężeń przyjmuje wartość:

$$\frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} = \frac{1}{3} R_e^2 \quad (22)$$

gdzie:

R_e - granica plastyczności dla stanu jednoosiowego obciążenia.

Zachowanie materiału sypkiego może być przedstawione za pomocą krzywej ciśnienia w funkcji odkształcenia postaciowego (rys. 22).



Rys. 22. Ciśnienie w funkcji odkształcenia postaciowego dla gleby i kruchych pianek [28]

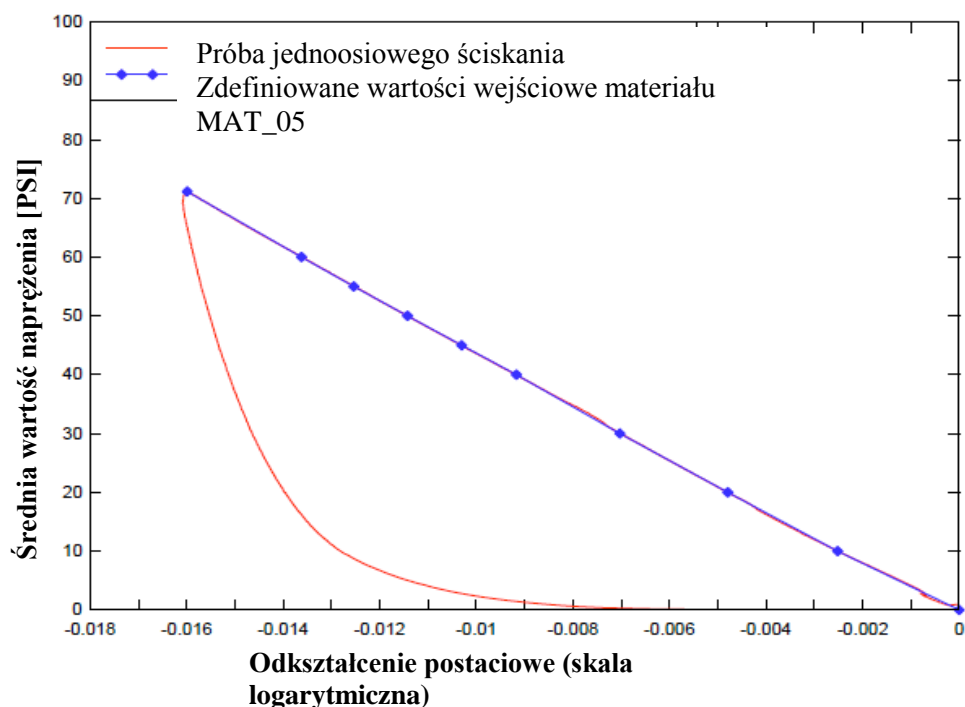
Dla ściskania wartość ciśnienia przyjmuje wartości dodatnie. Wartość odkształcenia postaciowego określona jest przez logarytm naturalny względnej objętości i przyjmuje wartości ujemne dla ściskania (względna objętość jest to stosunek bieżącej objętości i objętości początkowej).

Parametry gruntu zastosowane do przeprowadzenia symulacji numerycznej zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym zaczerpnięto z literatury [22][23]. Odpowiadają one w największym stopniu wymaganiom przedstawionym w PN 12767 odnośnie do zasypki gruntowej.

Tabela 6 Zestawienie parametrów materiałowych gruntu

Oznaczenie LS-Dyna wraz z opisem	Jednostka	Wartość
RO - Gęstość materiału	kg/m ³	2085
G - Moduł Kirchhoffa	MPa	23.03
K - Moduł Helmholtza	MPa	133.55
a0 - stała funkcji plastyczności	MPa ²	0.003
a1 - stała funkcji plastyczności	MPa	0.025
a2 - stała funkcji plastyczności	-	0.543
Ciśnienie graniczne przy rozciąganiu	MPa	-0.0068

Dodatkowo, w celu dokładnego odzwierciedlenia zachowania gruntu, zdefiniowano krzywą określającą dane testowe ze średniego naprężenia w funkcji odkształcenia logarytmicznego. Przyjęto założenie, że średnia wartość naprężenia jest równa ciśnieniu, a odkształcenie logarytmiczne jest logarytmiczną zmianą odkształcenia liniowego [87].



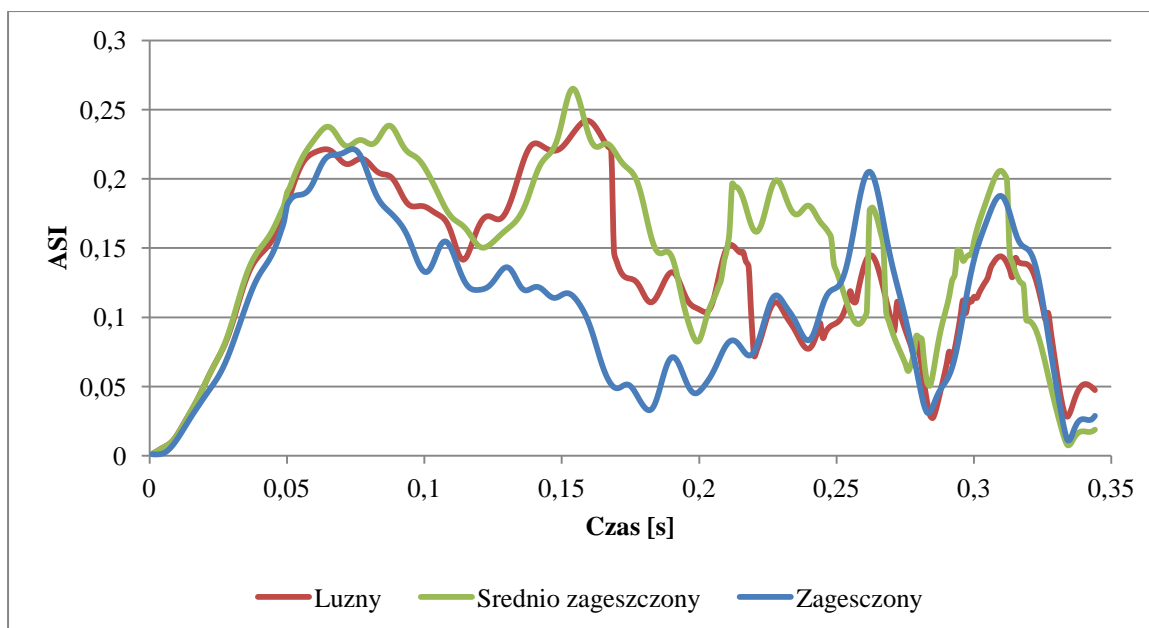
Rys. 23. Średnia wartość naprężenia w funkcji odkształcenia logarytmicznego [87]

W celu sprawdzenia wpływu zagęszczenia gruntu na wartość współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI przeprowadzono symulacje numeryczne dla trzech rodzajów gruntów. Gruntu luźnego, średnio zagęszczonego oraz gruntu zagęszczonego, których parametry odpowiadały wymaganiom stawianym przez polskie normy. Zestawienie podstawowych danych materiałowych dla trzech rodzajów gruntu przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7 Zestawienie parametrów materiałowych gruntu

Rodzaj gruntu	Moduł Kirkchoffa [MPa]	Moduł Helmholtza [MPa]
Luźny	6,90	11,50
Średnio zagęszczony	11,04	36,80
Zagęszczony	23,03	133,5

Zestawienie wykresów przedstawiających wartość współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI dla trzech rodzajów gruntów przedstawiono na rys. 24.



Rys. 24. Wartość współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI w zależności od stopnia zagęszczenia gruntu

Na podstawie danych przedstawionych na wykresie można zaobserwować, że najniższą wartość współczynnika ASI uzyskano dla słupa wkopanego w grunt najbardziej zagęszczony, czyli taki, jaki spełnia wymogi przedstawione w normach. W przypadku gruntu luźnego oraz średnio zagęszczonego można zaobserwować dwa piki, gdzie wartość współczynnika ASI wzrasta. Spowodowane są one tym, że w pierwszej fazie zderzenia część słupa znajdująca się pod powierzchnią najpierw przemieszcza się wewnątrz gruntu i dopiero w późniejszej fazie następuje odkształcenie części słupa znajdującej się nad powierzchnią.

5.4. Model materiału sprężysto-plastycznego

Obecnie najczęściej stosowanym materiałem konstrukcyjnym na słupy oświetleniowe jest aluminium. Materiał ten jest stosowany ze względu na niską masę oraz dobre właściwości mechaniczne, umożliwiające spełnienie kryteriów bezpieczeństwa biernego. Dlatego w kolejnych rozdziałach będą również przedstawione wyniki symulacji numerycznych dla słupa o takich samych parametrach geometrycznych, jednak wykonanego z aluminium. Ponadto uzyskane wyniki zostaną porównane z wynikami uzyskanymi dla materiału kompozytowego. Jako model materiałowy aluminium w symulacjach numerycznych zastosowano model MAT_024 PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY. Model ten jest modelem sprężysto-plastycznym,

który umożliwia uwzględnienie szybkości odkształcenia oraz kryterium zniszczenia opartego na odkształceniu plastycznym. Naprężenia w tym modelu materiałowym określone są na podstawie następującej zależności [28][29]:

$$\phi = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} - \frac{\sigma_y^2}{3} \leq 0 \quad (23)$$

$$\sigma_y = \beta [\sigma_0 + f_h(\varepsilon_{eff}^p)] \quad (24)$$

gdzie:

s_{ij} - dewiator tensora naprężeń,

σ_y - naprężenia plastyczne,

β - parametr umocnienia,

ε_{eff}^p - efektywne odkształcenie plastyczne,

$f_h(\varepsilon_{eff}^p)$ - funkcja umocnienia, która może zostać określona w formie tabularycznej lub określona na podstawie zależności:

$$f_h(\varepsilon_{eff}^p) = E_p(\varepsilon_{eff}^p) \quad (25)$$

gdzie:

E_p - moduł umocnienia

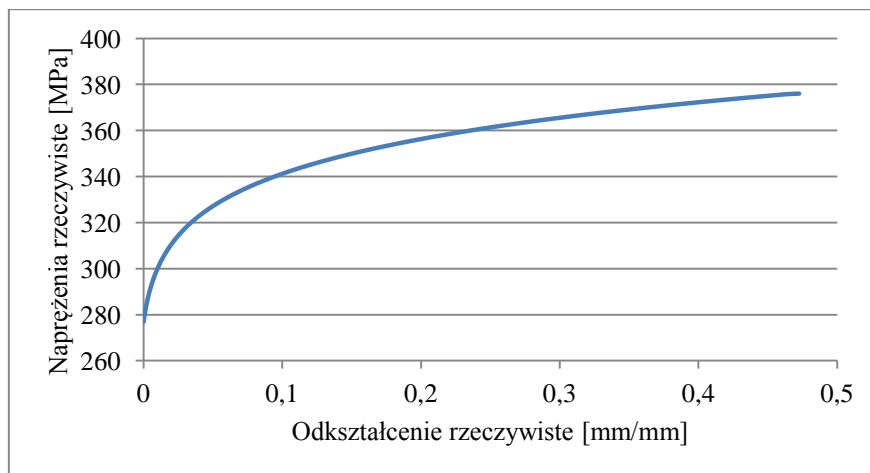
Dane dotyczące aluminium 6061T6 stosowanego na słupy oświetleniowe zaczerpnięto ze strony internetowej prowadzonej przez emerytowanego pracownika Lawrence Livermore National Laboratory, producenta oprogramowania LS Dyna, który przepracował w tej firmie 30 lat [106].

W tabeli 8 przedstawiono stałe materiałowe dla aluminium 6061T6.

Tabela 8. Zestawienie stałych materiałowych dla aluminium 6061T6 [106]

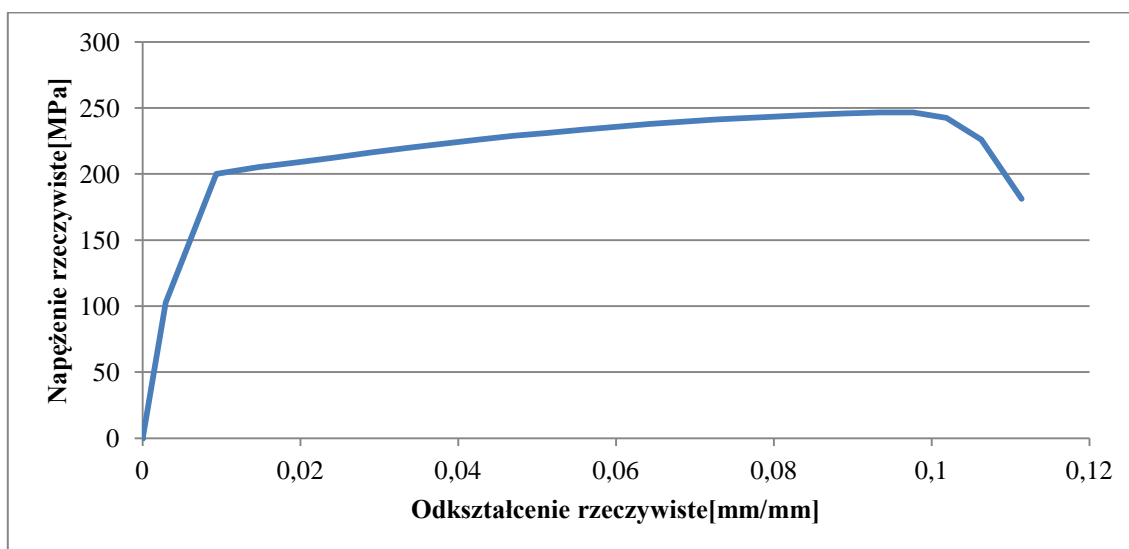
Oznaczenie LS-Dyna wraz z opisem	Jednostka	Wartość
RO - Gęstość materiału	kg/m ³	2713
E - Moduł Young	MPa	68950
PR - Liczba Poissona	-	0,33
SIGY - Granica plastyczności	MPa	276,94
FAIL - Odkształcenie niszczące	m/m	0,4726

Dodatkowo, oprócz danych przedstawionych w tabeli 8, zdefiniowano krzywą naprężenia rzeczywistego w funkcji odkształcenia rzeczywistego (rys. 25).



Rys. 25. Naprężenia rzeczywiste w funkcji odkształcenia rzeczywistego dla aluminium 6061T6 [106]

Badania doświadczalne dla aluminium stosowanego na słupy oświetleniowe były tematem wcześniejszych prac własnych, a otrzymane wyniki przedstawiono na rys. 26.



Rys. 26. Naprężenie rzeczywiste w funkcji odkształcenia rzeczywistego dla aluminium stosowanego na słupy oświetleniowe

Podjęto jednak decyzję o zastosowaniu w pracy modelu materiałowego, który został wcześniej poddany walidacji. Wyniki uzyskane na jego podstawie mogą być bardziej zbliżone do rzeczywistych.

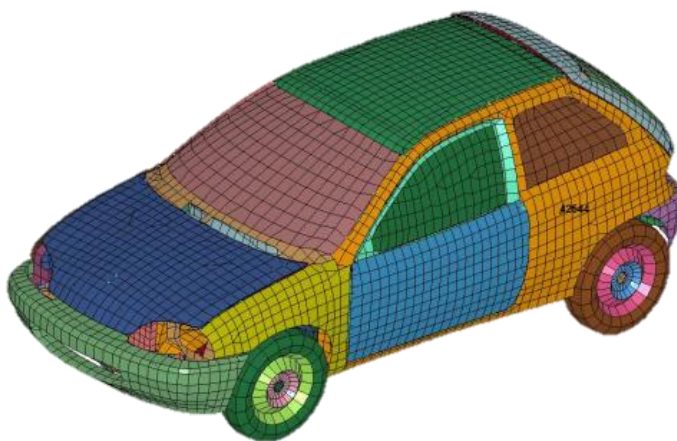
6. Symulacje numeryczne zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym

Symulacje numeryczne przedstawione w tym rozdziale zrealizowano w oprogramowaniu LS Dyna, umożliwiającym symulowanie zjawisk dynamicznych w konwencji metody elementów skończonych. Testy wirtualne przeprowadzono dla dwóch prędkości: 35 km/h oraz 50 km/h. Odpowiadają one klasie prędkości do jakiej przypisana jest ta konstrukcja wsporcza (patrz rozdział 2.1 i 4).

Do badań symulacyjnych zderzenia zastosowano model pojazdu Suzuki Swift, który został pobrany z biblioteki publicznej udostępnionej przez National Crash Analysis Center. W pojeździe wprowadzono pewne modyfikacje, mające na celu dostosowanie modelu do kryteriów badań zderzeniowych przedstawionych w normach (opisano je również w rozdziale 4). Główne zmiany polegały na:

- dostosowaniu położenia środka ciężkości do kryteriów przedstawionych w normach,
- modyfikacji warunków początkowo-brzegowych związanych z definicją prędkości liniowej wszystkich węzłów wchodzących w skład pojazdu,
- prędkości kątowych poszczególnych kół.

Model pojazdu, zastosowany w tej pracy został przedstawiony na rys. 27.



Rys. 27. Model pojazdu Suzuki Swift zastosowany w symulacjach numerycznych [100]

Dane dotyczące parametrów masowych i geometrycznych oraz elementów, jakie zostały wykorzystane do dyskretyzacji tego modelu, przedstawiono w tabeli 9.

Tabela 9. Parametry geometryczne pojazdu oraz podział na elementy skończone

Masa pojazdu [kg]	860
Rozstaw osi [mm]	2371
Liczba węzłów	19271
Liczba elementów bryłowych	820
Liczba elementów belkowych	4
Liczba elementów powłokowych	15330
Łączna liczba elementów skończonych	16154
Liczba części	242
Liczba modeli materiałowych	6

Wszystkie części wchodzące w skład elementów konstrukcyjnych pojazdu zamodelowano jako stal niskowęglowa z zastosowaniem modelu materiałowego MAT_024 PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY. Opony pojazdu zamodelowano z wykorzystaniem modelu materiałowego MAT_007 BLATZ-KO RUBBER. Pozostałe elementy, takie jak silnik, elementy układu zawieszenia czy szyby, zamodelowano jako elementy nieodkształcalne lub z zastosowaniem modeli materiałowych (MAT_001, MAT_009, MAT_020, MAT_S01 lub MAT_S02).

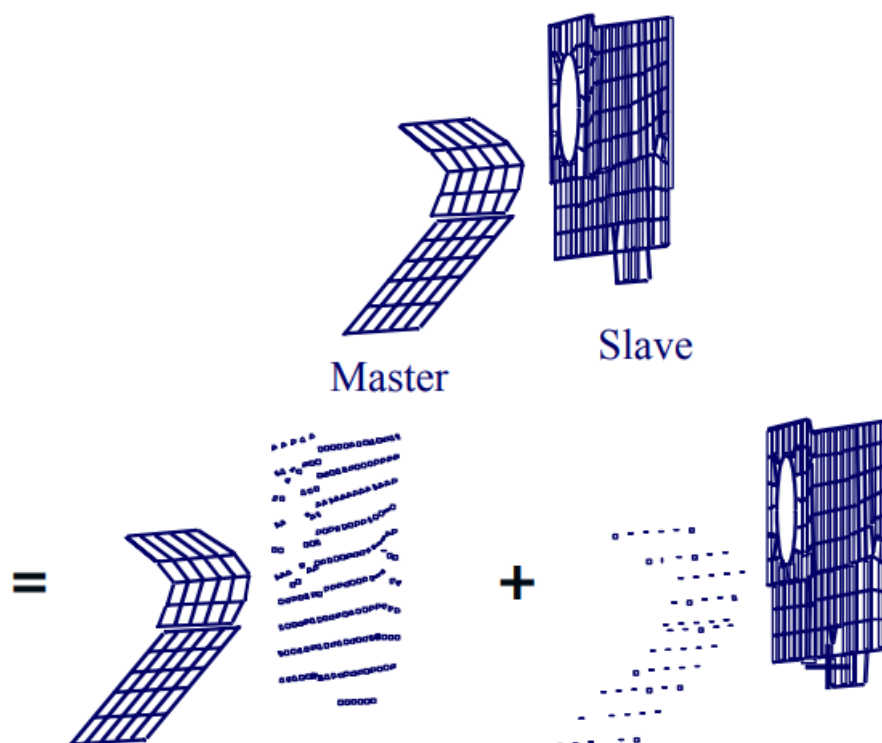
Przedstawiony model jest jednym z najczęściej wykorzystywanych modeli pojazdu lekkiego o masie do 900kg w pracach naukowych [1][9][41][46][54][60][62], ma on jednak pewne nieścisłości w odniesieniu do rzeczywistej konstrukcji pojazdu, takie jak brak układu kierowniczego czy nieprawidłowo działający układ zawieszenia, zarówno z przodu, jak i z tyłu pojazdu. Część autorów stosuje model pojazdu udostępniony przez NCAC, natomiast w niektórych pracach autorzy wprowadzają do pojazdu własne modyfikacje. Najobszerniej te zmiany przedstawiono w pracy [54]. Jej autorzy wprowadzili do modelu, zawieszenie zgodne z tym, jakie występowało w pojeździe oraz skupili się na tym, aby mechanizm skrętu uwzględniał nierównoległy skręt kół zgodnie z geometrią Ackermana.

W celu odzwierciedlenia rzeczywistych warunków panujących w trakcie zderzenia słup oświetleniowy zamodelowano wraz z drzwiczkami inspekcyjnymi i wysięgnikiem oraz osadzono w gruncie. Konstrukcję osadzono w gruncie ze względu na przemieszczenie części słupa znajdującej się pod ziemią, ma to istotny wpływ na wartość współczynników bezpieczeństwa biernego [62][63]. Podczas symulacji numerycznych zderzeń występują znaczne deformacje elementów i określenie miejsca i sposobu

kontaktu może być trudne lub nawet niemożliwe. Dlatego zgodnie z literaturą [28][29][97][98] przyjęto kontakt typu Automatic, który jest nieorientowany i umożliwia wykrycie penetracji z obu stron elementu powłokowego.

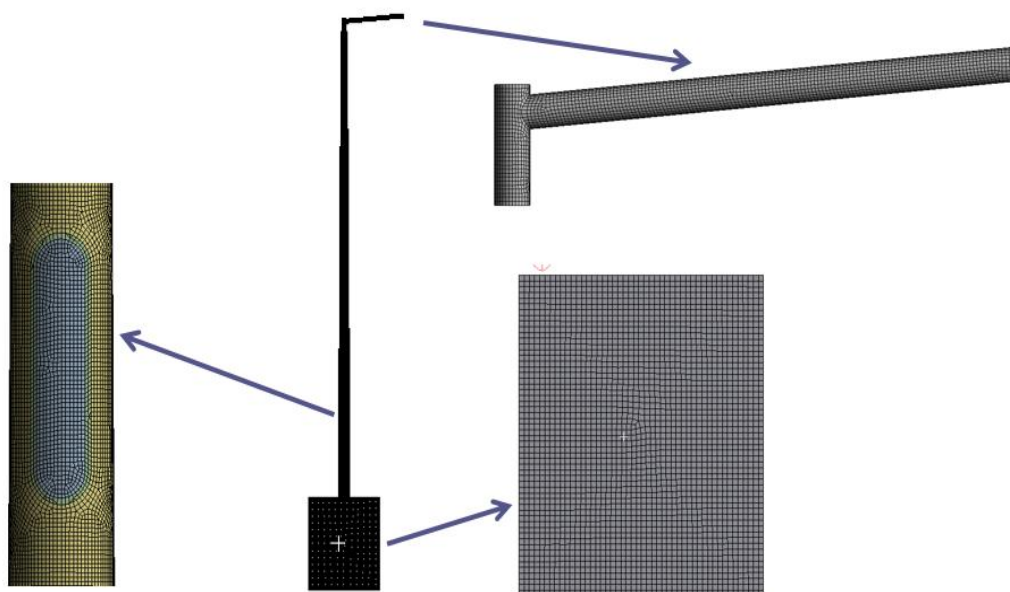
Pomiędzy słupem oraz pojazdem zdefiniowano model kontaktu CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE ze współczynnikiem tarcia zaczerpniętym z literatury [11][84] i wynoszącym 0,14.

Zastosowany model kontaktu jest kontaktem dwustronnym, w którym algorytmy odpowiedzialne za sprawdzanie penetracji wywoływane są dwukrotnie. Za pierwszym razem sprawdzane są węzły typu Slave pod kątem penetracji segmentów typu Master, następnie węzły typu Master pod kątem penetracji przez segmenty typu Slave. Dzięki temu definicja powierzchni typu Slave i Master jest dowolna, a uzyskane wyniki będą takie same, ponieważ kontakt jest symetryczny. Zastosowanie tego rodzaju kontaktu wiąże się z dwukrotnym zwiększeniem kosztu obliczeń ze względu na potrzebę dwukrotnego wywoływania algorytmu. Zasadę działania tego rodzaju kontaktu przedstawiono na rys. 28.



Rys. 28. Ilustracja zasady działania modelu kontaktu Automatic_Surface_to_Surface [98]

Do dyskretyzacji geometrii słupa oświetleniowego oraz drzewiczek zastosowano elementy powłokowe prostokątne, którym przypisano sformułowanie ELFORM 16 (element w pełni zintegrowany z czterema punktami całkowania w płaszczyźnie elementu [28]). W przypadku gruntu zastosowano elementy heksagonalne, którym przypisano sformułowanie ELFORM 1 (8-węzłowy element bryłowy z jednym punktem całkowania [28]). Wysięgnik, tak jak model gruntu, zdyskretyzowano z zastosowaniem elementów heksagonalnych ze sformułowaniem ELFORM 1.



Rys. 29. Podział słupa oświetleniowego wraz z gruntem i wysięgnikiem na elementy skończone

Dane odnośnie słupa oświetleniowego przyjęte do obliczeń numerycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych w środowisku LS Dyna przedstawiono w tabeli 10.

Tabela 10 Parametry geometryczne słupa oświetleniowego oraz podział na elementy skończone

Wysokość słupa [m]	7
Grubość ścianki słupa [mm]	4
Waga netto słupa [kg]	
kompozytowego	40
aluminiowego	65
Wymiary podłoża	Zgodnie z normą PN- EN 12767
Liczba węzłów	593897

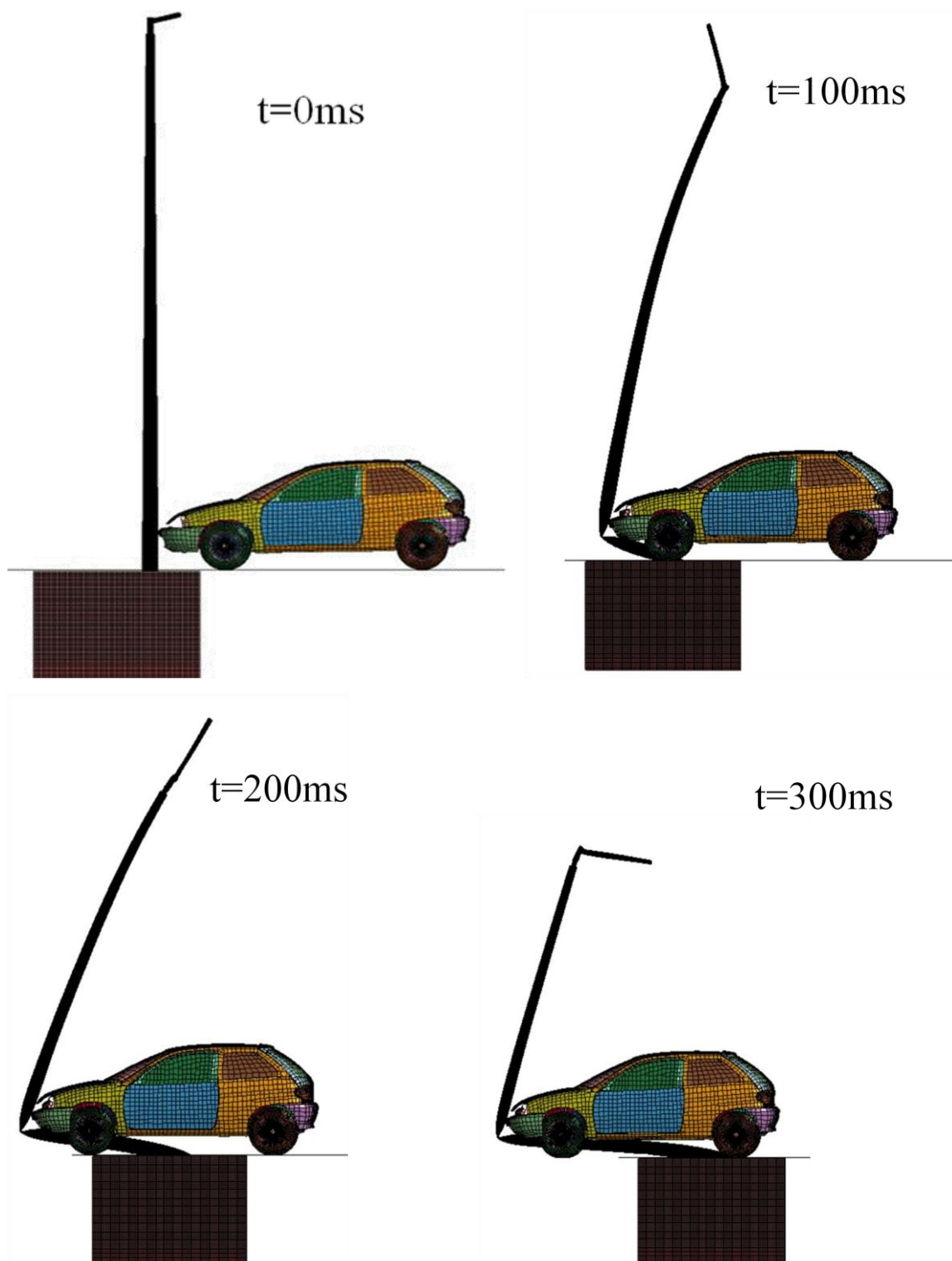
Liczba elementów bryłowych	430775
Liczba elementów powłokowych	87121
Liczba modeli materiałowych	2

Zgodnie z PN-EN1317:2010 każdy wynik uzyskany z przeprowadzonej symulacji numerycznej poddano filtrowaniu z zastosowaniem filtra o klasie częstotliwości kanału wynoszącej 13Hz.

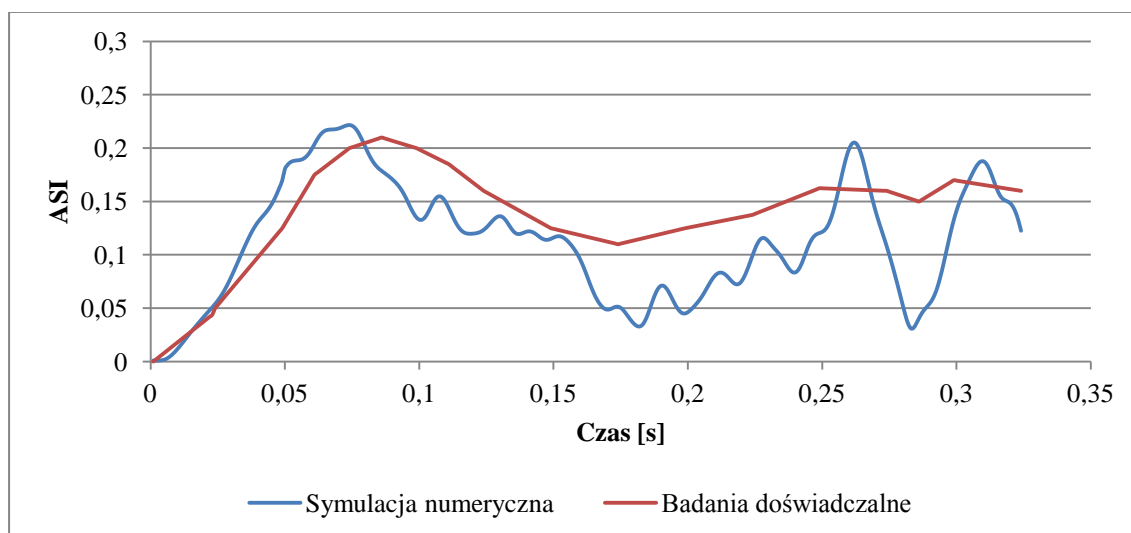
W celu rozwiązania układu równań różniczkowych, uzyskanych na podstawie dyskretyzacji modelu, zastosowano jawny sposób całkowania (Explicit), charakteryzujący się poszukiwaniem rozwiązania dla kolejnego kroku, z wykorzystaniem wyłącznie wyników uzyskanych z obecnego kroku czasowego. Na układ zostały nałożone dodatkowe warunki związane z przemieszczeniami poszczególnych elementów oraz wymuszeniami działającymi na dany model. W przypadku warunków związanych z przemieszczeniami odebrano wszystkie stopnie swobody w węzłach znajdujących się na zewnętrznych ścianach gruntu. Natomiast jako wymuszenie przyjęto prędkości wynikające z miejsca zamocowania słupa oświetleniowego, wynoszące odpowiednio 35 i 50km/h. Wymuszenie w postaci prędkości zadano dla wszystkich węzłów pojazdu oraz zdefiniowano prędkość kątową kół pojazdu wyznaczoną na podstawie znajomości średnicy koła. Dodatkowo, aby w trakcie symulacji warunki były jak najbardziej zbliżone do rzeczywistości, w układzie działała siła ciężkości.

6.1. Wyniki dla zderzenia przy prędkości 50 km/h

W podrozdziale tym przedstawiono wyniki uzyskane w trakcie zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym przy prędkości 50 km/h. Wyniki symulacji numerycznej dotyczące słupa wykonanego z materiału kompozytowego porównano z wynikami z badań doświadczalnych, realizowanych w ramach międzynarodowej konferencji "Polska wizja zero". Podczas badań na poligonie zastosowano pojazd Opel Corsa, reprezentujący tę samą grupę pojazdów, co zastosowany w symulacjach numerycznych. Masa pojazdu testowego wynosiła 850 kg, co oznacza, że pojazd ten był o 10 kg lżejszy od konstrukcji wykorzystanej w testach wirtualnych. Porównanie wyników odbywało się na podstawie zestawienia poszczególnych chwil zderzenia oraz wartości współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI.

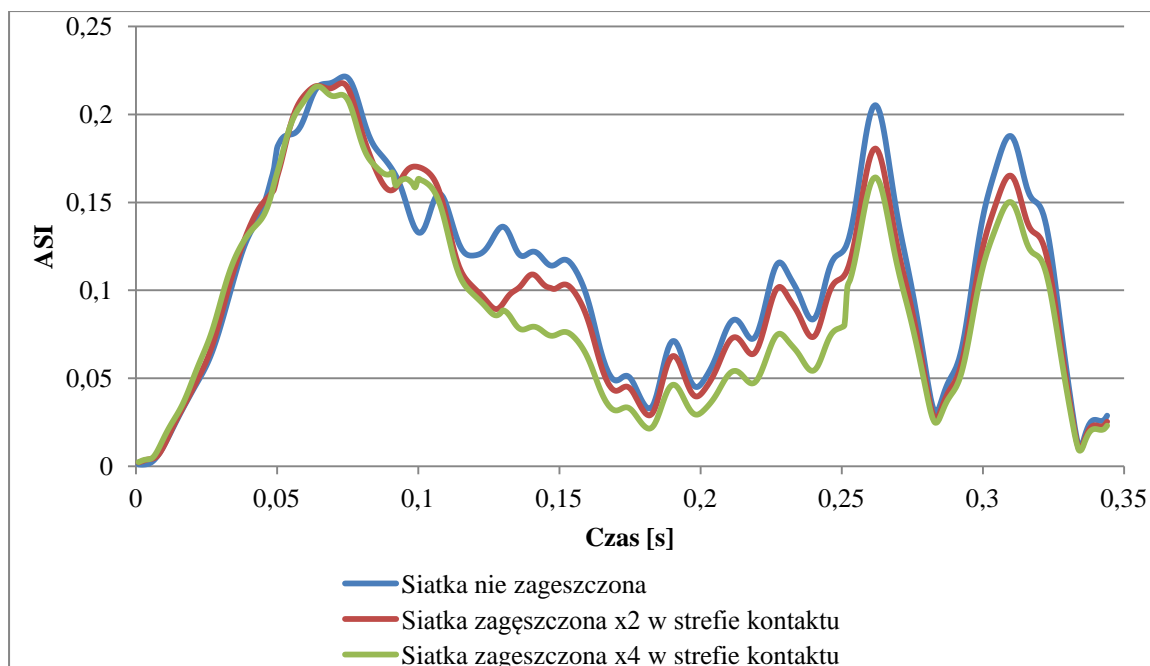


Rys. 30. Analiza jakościowa zderzenia pojazdu z kompozytowym słupem oświetleniowym przy prędkości 50 km/h dla czasu $t=0\text{ ms}$, $t=100\text{ ms}$, $t=200\text{ ms}$ oraz $t=300\text{ ms}$



Rys. 31. Wartość współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI w funkcji czasu uzyskana z symulacji numerycznej i badań doświadczalnych dla słupa wykonanego z materiału kompozytowego przy zderzeniu z prędkością 50 km/h

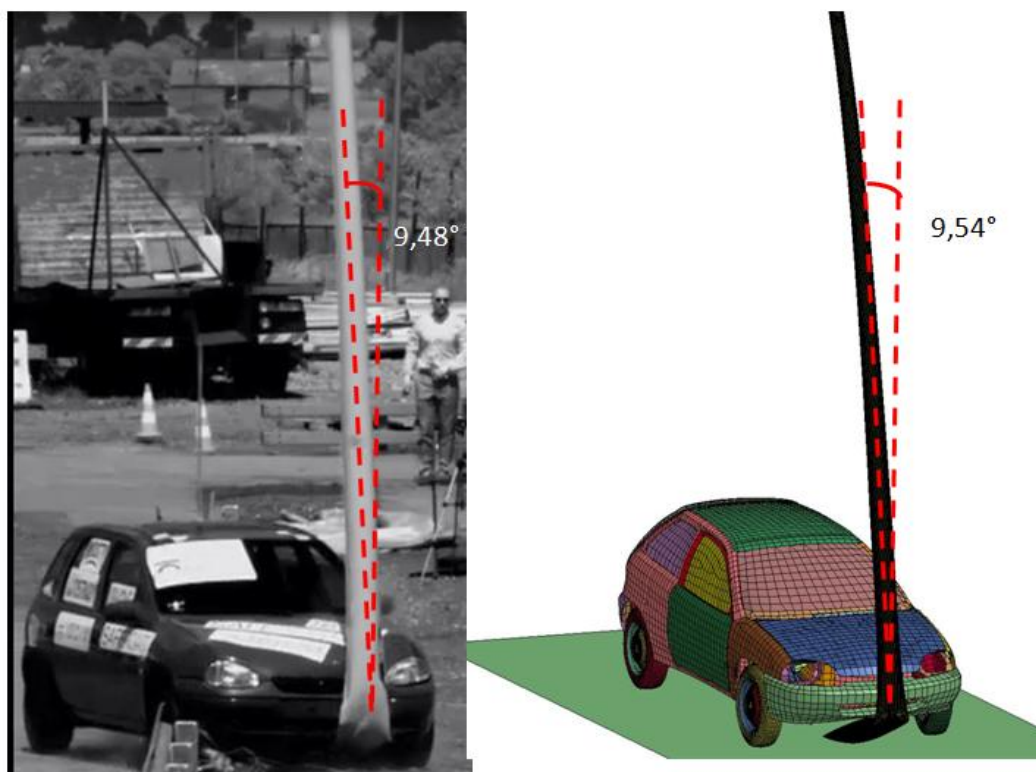
Na podstawie danych przedstawionych na rys. 31. określono współczynnik korelacji r-Pearsona [27], który wynosił 0,724 co, zgodnie z literaturą [104], określa silną korelację pomiędzy dwoma wykresami. Wpływ na uzyskaną wartość współczynnika korelacji niewątpliwie ma różnica pomiędzy pojazdami zastosowanymi do badań doświadczalnych i symulacji numerycznych. Niestety, nie udało się przeprowadzić badań doświadczalnych dokładnie dla takiej samej konstrukcji pojazdu. Wyniki przedstawione na rys. 30 zostały wzbogacone o wyznaczoną wartość drugiego współczynnika bezpieczeństwa biernego THIV. Wartość tego współczynnika wyniosła 39,6km, niestety, ze względu na niedostateczne dane uzyskane z testów zderzeniowych, nie udało się porównać tej wartości z wartością współczynnika uzyskaną z eksperymentu. W celu sprawdzenie wpływu wielkości elementów skończonych na wartość współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI podjęto decyzję o przeprowadzeniu dodatkowych symulacji, w których zagęszczono siatkę elementów skończonych w strefie kontaktu słupa oświetleniowego z pojazdem. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 32.



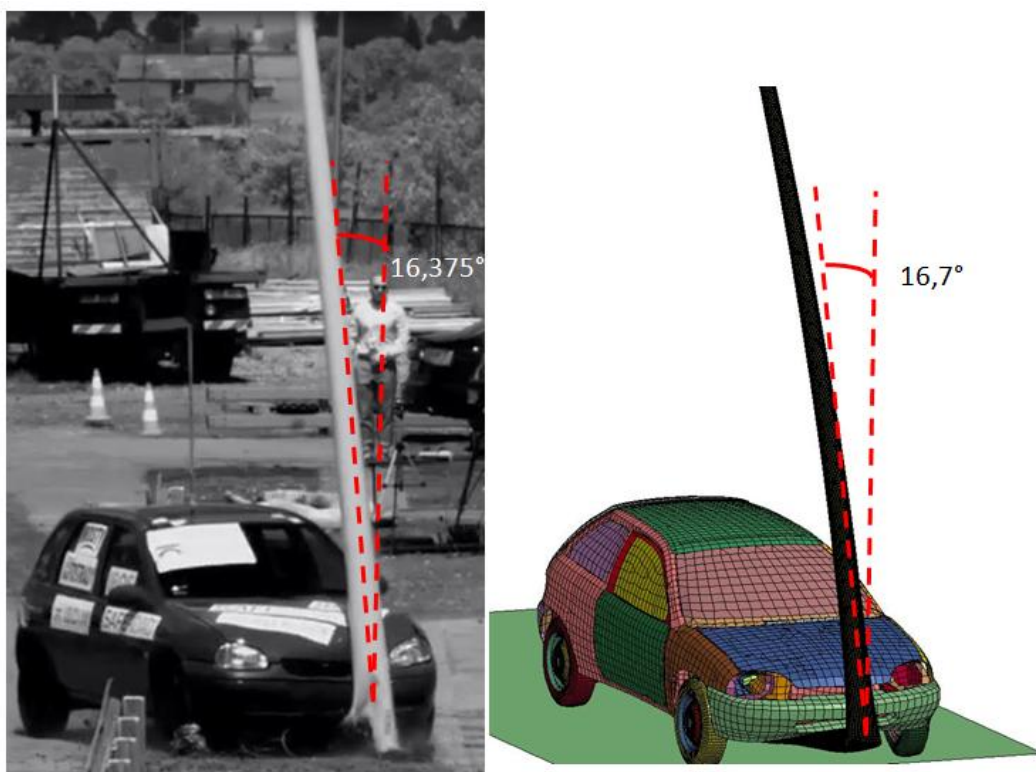
Rys. 32. Wpływ zagęszczenia siatki elementów skończonych w strefie kontaktu na wartość współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI

Na podstawie uzyskanych danych stwierdzono, że zagęszczenie siatki elementów skończonych w strefie kontaktu umożliwia poprawę współczynnika korelacji r-Pearsona o 2% dla dwukrotnego zagęszczenia siatki, natomiast przy czterokrotnym zagęszczeniu poprawa wynosi około 4%. Jednocześnie zaobserwowano znaczny wzrost czasu trwania procesu obliczeniowego, który wzrósł o około 20-30%.

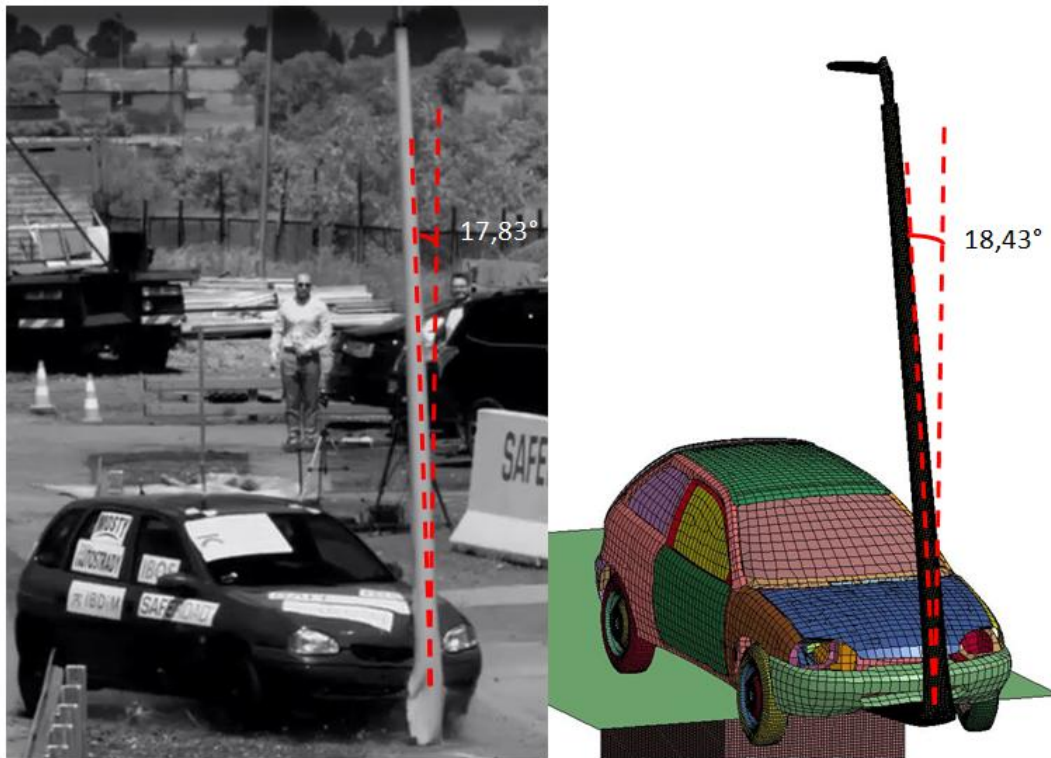
Dodatkowo przeprowadzono analizę porównawczą klatek filmu z odpowiadającymi danej chwili czasu klatkami uzyskanymi z symulacji numerycznej. Porównanie to przedstawiono na rys. od 33 do 36.



Rys. 33. Analiza porównawcza fragmentu filmu i symulacji numerycznej dla słupa wykonanego z materiału kompozytowego dla czasu $t=100$ ms



Rys. 34. Analiza porównawcza fragmentu filmu i symulacji numerycznej dla słupa wykonanego z materiału kompozytowego dla czasu $t=200$ ms



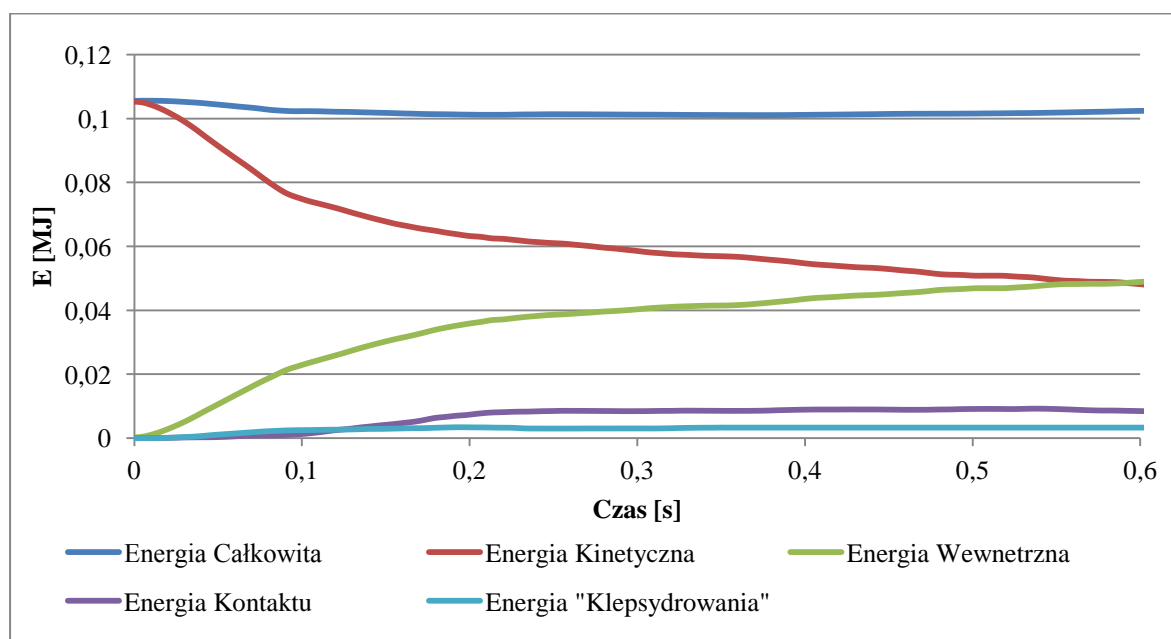
Rys. 35. Analiza porównawcza fragmentu filmu i symulacji numerycznej dla słupa wykonanego z materiału kompozytowego dla czasu $t=300$ ms



Rys. 36. Analiza porównawcza fragmentu filmu i symulacji numerycznej dla słupa wykonanego z materiału kompozytowego dla czasu $t=500$ ms

Na podstawie analizy porównawczej poszczególnych chwil zderzenia oraz odpowiadających im czasom symulacji numerycznej zaobserwowano duże podobieństwo wyników uzyskanych z badań doświadczalnych oraz symulacji numerycznej. Różnice pomiędzy kątem wychylenia słupa oświetleniowego w trakcie uderzenia wynoszą mniej niż 1° . Pewne różnice zaobserwowano dla czasu $t=300\text{ms}$, gdzie w przypadku badań doświadczalnych można było zauważyć zboczenie pojazdu z kursu i jego rotację względem pionowej osi. Natomiast nie zaobserwowano takiego zjawiska przy symulacji numerycznej. Spowodowane może to być przesunięciem punktu uderzenia na pojeździe od środka pojazdu.

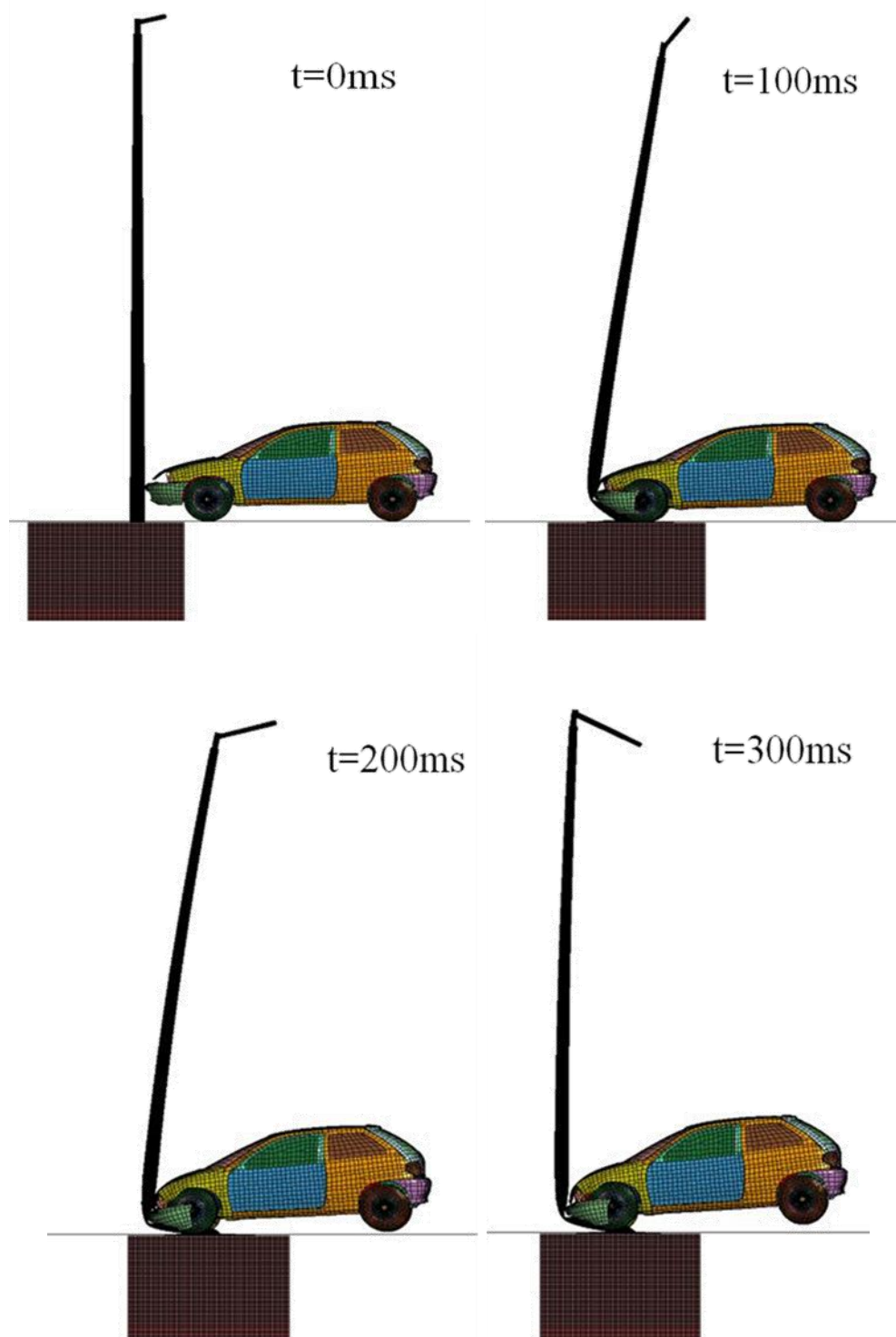
Na podstawie bilansu energetycznego, służącego do analizy procesu pochłaniania energii oraz kontroli poprawności symulacji numerycznej przedstawionego na rys. 37 określono, że w trakcie zderzenia pochłonięte zostało 55% energii kinetycznej pojazdu. Dodatkowo określono, że wartość "energii klepsydrowania" w stosunku do maksymalnej wartości energii całkowitej wynosi 3,4%, co jest mniejsze od zalecanych wartości.



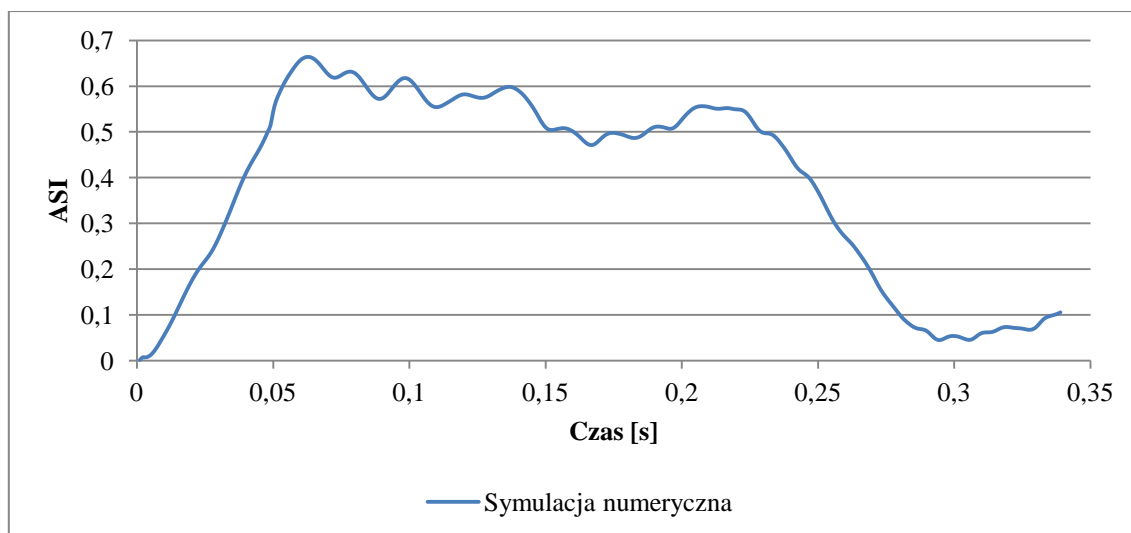
Rys. 37. Bilans energetyczny symulacji numerycznej zderzenia pojazdu z kompozytowym słupem oświetleniowym z prędkością 50km/h

Dodatkowo przeprowadzono symulacje numeryczne dla zderzenia pojazdu z słupem oświetleniowym wykonanym z aluminium. Miało to na celu porównanie wartości współczynników bezpieczeństwa biernego ASI i THIV oraz porównanie jakościowe zderzenia pojazdów ze słupami przy dwóch różnych materiałach stosowanych

na konstrukcje wsporcze. Tak jak w przypadku wyników dla słupa wykonanego z materiału kompozytowego, przedstawiono analizę jakościową poszczególnych chwil zderzenia oraz wartość współczynników bezpieczeństwa biernego ASI oraz THIV.



Rys. 38. Analiza jakościowa zderzenia pojazdu z aluminiowym słupem oświetleniowym przy prędkości 50 km/h dla chwil czasu $t=0\text{ ms}$, $t=100\text{ ms}$, $t=200\text{ ms}$ oraz $t=300\text{ ms}$

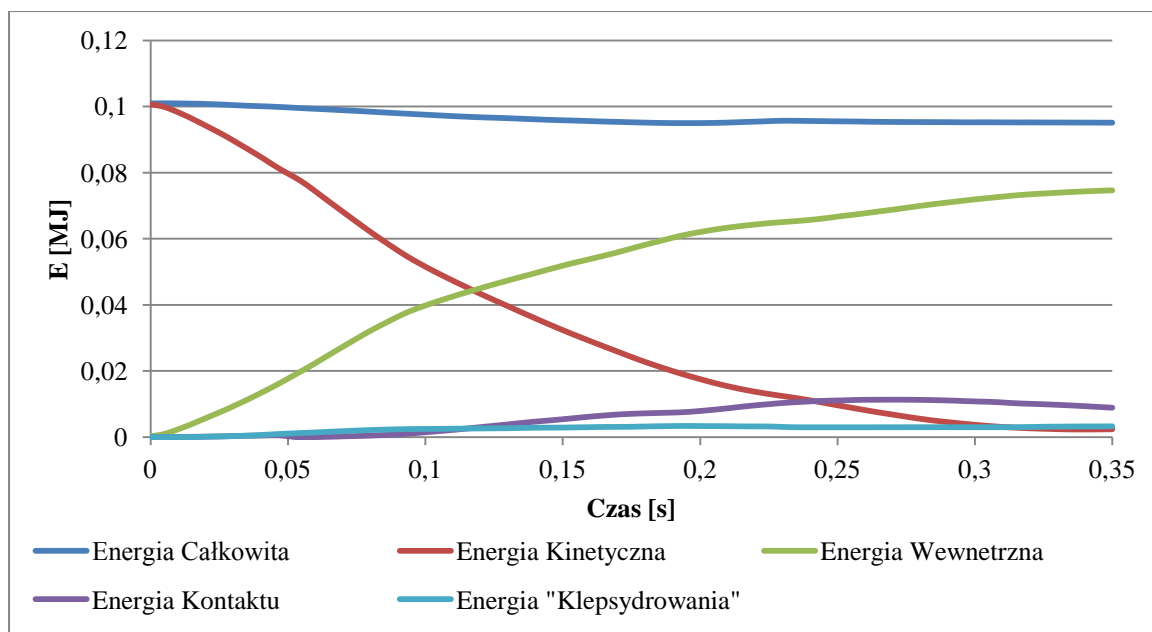


Rys. 39. Wartość współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI w funkcji czasu uzyskana z symulacji numerycznej dla słupa wykonanego z aluminium przy zderzeniu z prędkością 50 km/h

Wyznaczona wartość współczynnika THIV przy zderzeniu pojazdu z aluminiowym słupem oświetleniowym była równa 29,2 km/h.

Analizując zderzenia pojazdu przy prędkości uderzenia 50km/h ze słupem oświetleniowym wykonanym z materiału kompozytowego oraz z aluminium, można zauważyć, że słup wykonany z materiału kompozytowego umożliwia uzyskanie zdecydowanie niższej wartości współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI (0,22), jest ona ponad trzykrotnie niższa niż w wypadku słupa wykonanego z aluminium (0,68). W przypadku współczynnika THIV można zaobserwować, że dla słupa wykonanego z aluminium jest ona niższa niż dla słupa wykonanego z materiału kompozytowego, natomiast ta różnica nie jest znaczna i wynosi około 5%. Słup aluminiowy po zderzeniu doznał znacznego odkształcenia, natomiast nie przewrócił się na podłoże, jak to się stało ze słupem kompozytowym. Wystąpienie takiego zjawiska może nieść ze sobą dodatkowe ryzyko dla innych uczestników ruchu znajdujących się w niewielkiej odległości od miejsca zdarzenia, natomiast umożliwia zredukowanie uszkodzeń pojazdu.

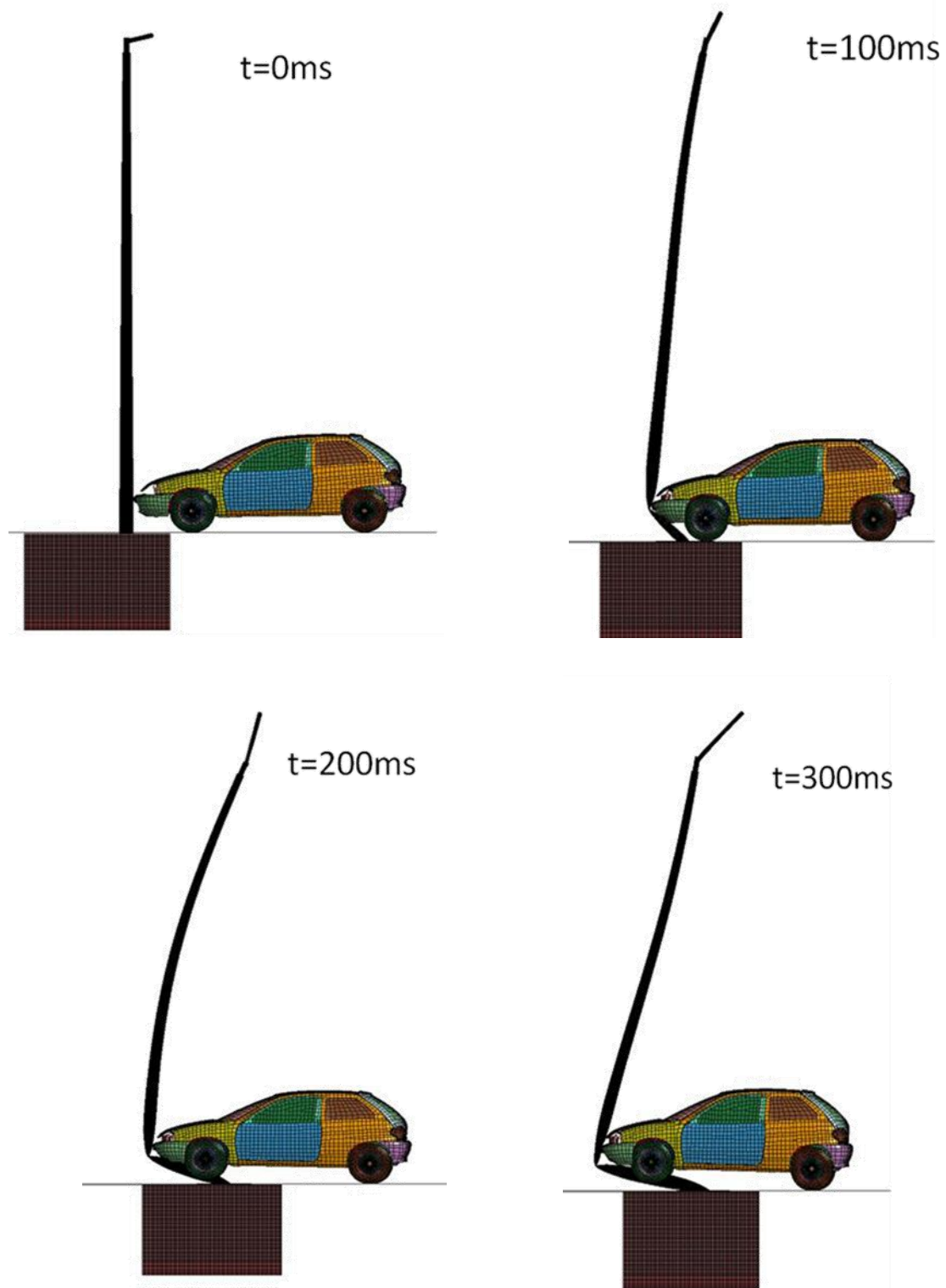
Na podstawie bilansu energetycznego, służącego do analizy procesu pochłaniania energii oraz kontroli poprawności symulacji numerycznej przedstawionego na rys. 40. określono, że w trakcie zderzenia pochłonięte zostało 97% energii kinetycznej pojazdu. Dodatkowo określono, że wartość "energii klepsydrowania" w stosunku do maksymalnej wartości energii całkowitej wynosi 3,6%, co jest mniejsze od zalecanych wartości.



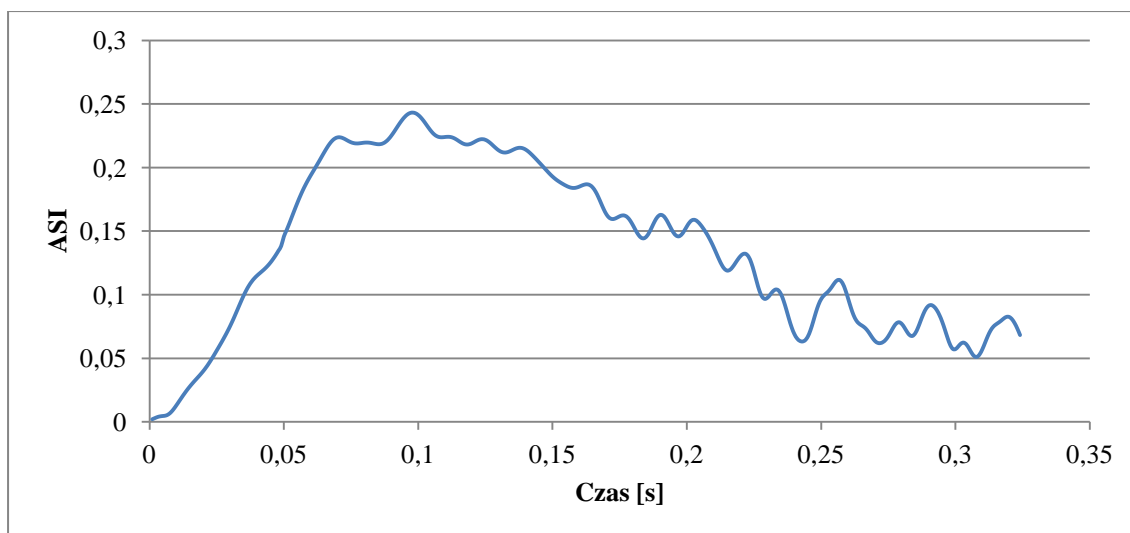
Rys. 40. Bilans energetyczny symulacji numerycznej zderzenia pojazdu z aluminiowym słupem oświetleniowym z prędkością 50km/h

6.2. Wyniki dla zderzenia przy prędkości 35 km/h

W podrozdziale tym przedstawiono wyniki zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym wykonanym z materiałów: kompozytowego i aluminium. Prędkość pojazdu ustalono na 35 km/h, co jest zgodne z kryteriami badań słupów oświetleniowych w założonej klasie bezpieczeństwa biernego. W pierwszej kolejności przedstawiono wyniki uzyskane przy zderzeniu pojazdu ze słupem oświetleniowym wykonanym z materiału kompozytowego



Rys. 41. Analiza jakościowa zderzenia pojazdu z kompozytowym słupem oświetleniowym przy prędkości 35 km/h dla chwil czasu $t=0\text{ ms}$, $t=100\text{ ms}$, $t=200\text{ ms}$ oraz $t=300\text{ ms}$

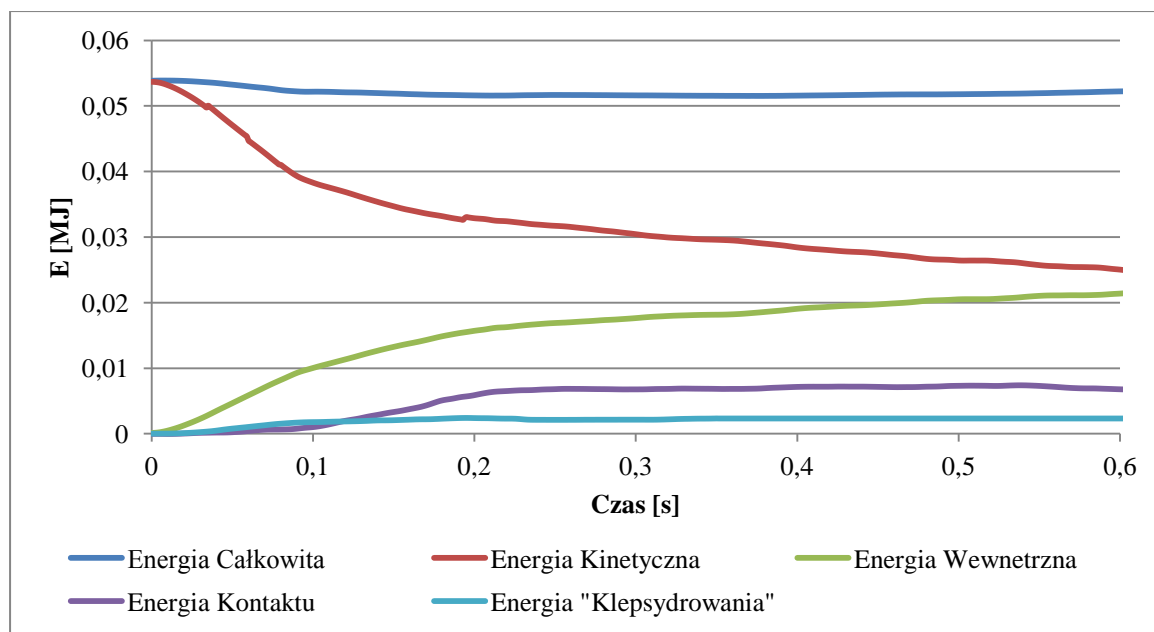


Rys. 42. Wartość współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI w funkcji czasu uzyskana z symulacji numerycznej dla słupa wykonanego z materiału kompozytowego przy zderzeniu z prędkością 35 km/h

Wyznaczona wartość współczynnika THIV dla zderzenia pojazdu z kompozytowym słupem oświetleniowym była równa 32,1km/h

Analizując sytuację zderzenia pojazdu jadącego z prędkością 35 km/h ze słupem oświetleniowym wykonanym z materiału kompozytowego można zauważyć, że wartość współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI wyniosła nieznacznie więcej niż podczas uderzenia z prędkością 50 km /h.

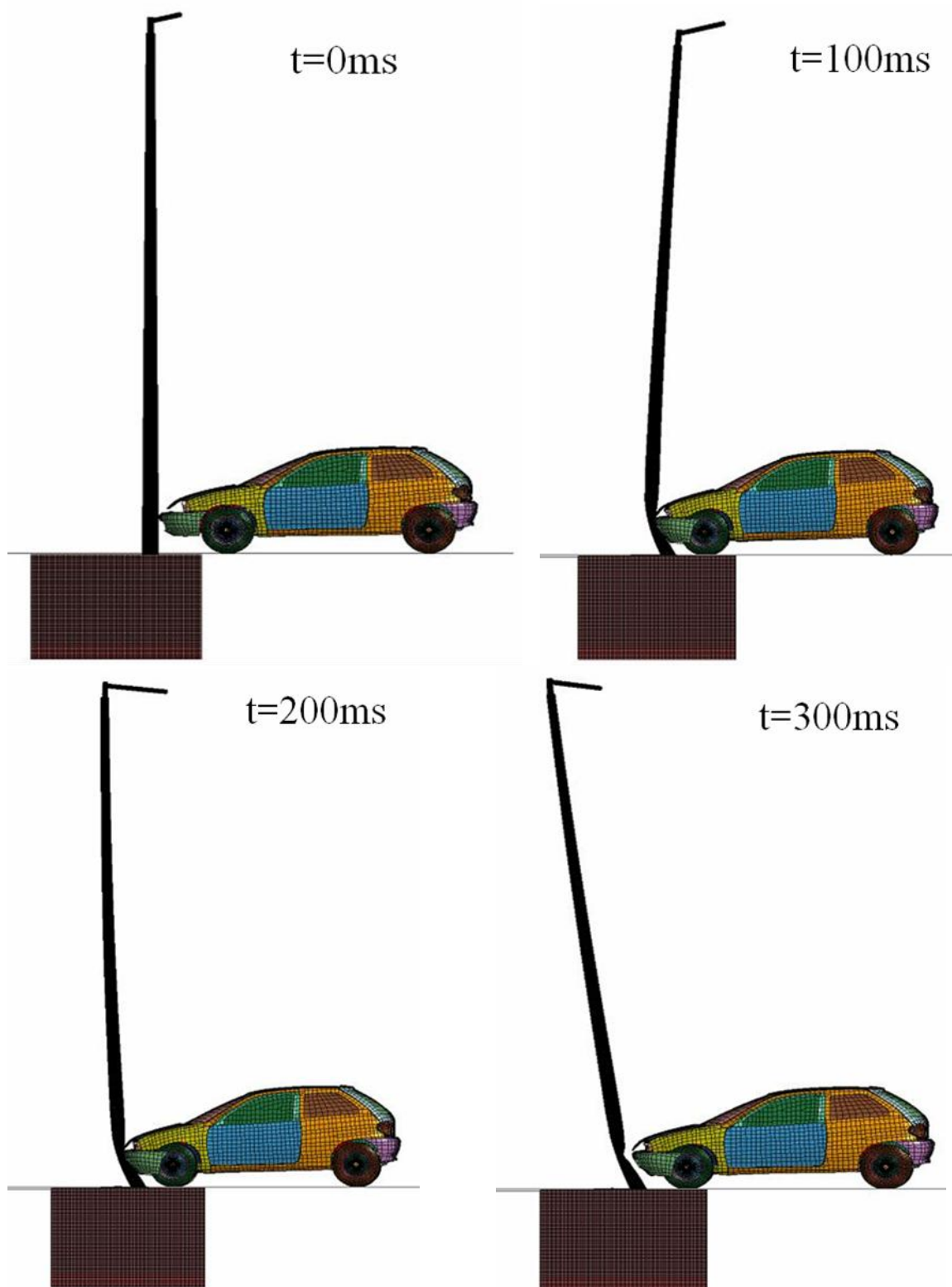
Na podstawie bilansu energetycznego, służącego do analizy procesu pochłaniania energii oraz kontroli poprawności symulacji numerycznej przedstawionego na rys. 43 określono, że w trakcie zderzenia pochłonięte zostało 54% energii kinetycznej pojazdu. Dodatkowo określono, że wartość "energii klepsydrowania" w stosunku do maksymalnej wartości energii całkowitej wynosi 4,6%, co jest mniejsze od zalecanych wartości.



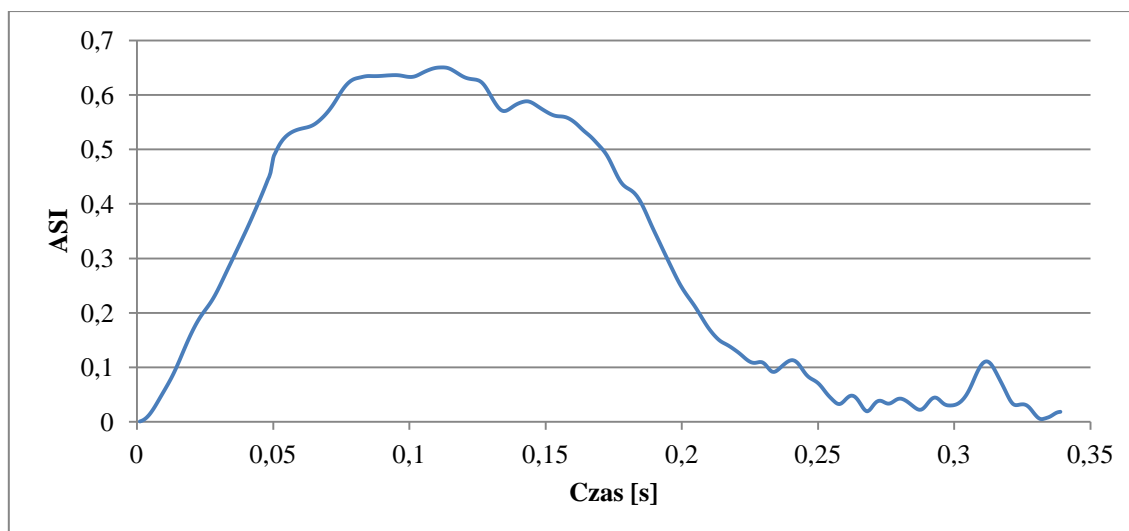
Rys. 43. Bilans energetyczny symulacji numerycznej zderzenia pojazdu z kompozytowym słupem oświetleniowym z prędkością 35km/h

Dodatkowo przeprowadzono symulacje numeryczne dotyczące zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym wykonanym z aluminium. Miało to na celu:

- porównanie wartości współczynników bezpieczeństwa biernego ASI oraz THIV przy dwóch różnych materiałach stosowanych na konstrukcje wsporcze,
- porównanie jakościowe zderzenia słupów wykonanych z dwóch różnych materiałów konstrukcyjnych.



Rys. 44. Analiza jakościowa zderzenia pojazdu z aluminiowym słupem oświetleniowym przy prędkości 35 km/h dla chwil czasu $t=0\text{ ms}$, $t=100\text{ ms}$, $t=200\text{ ms}$ oraz $t=300\text{ ms}$

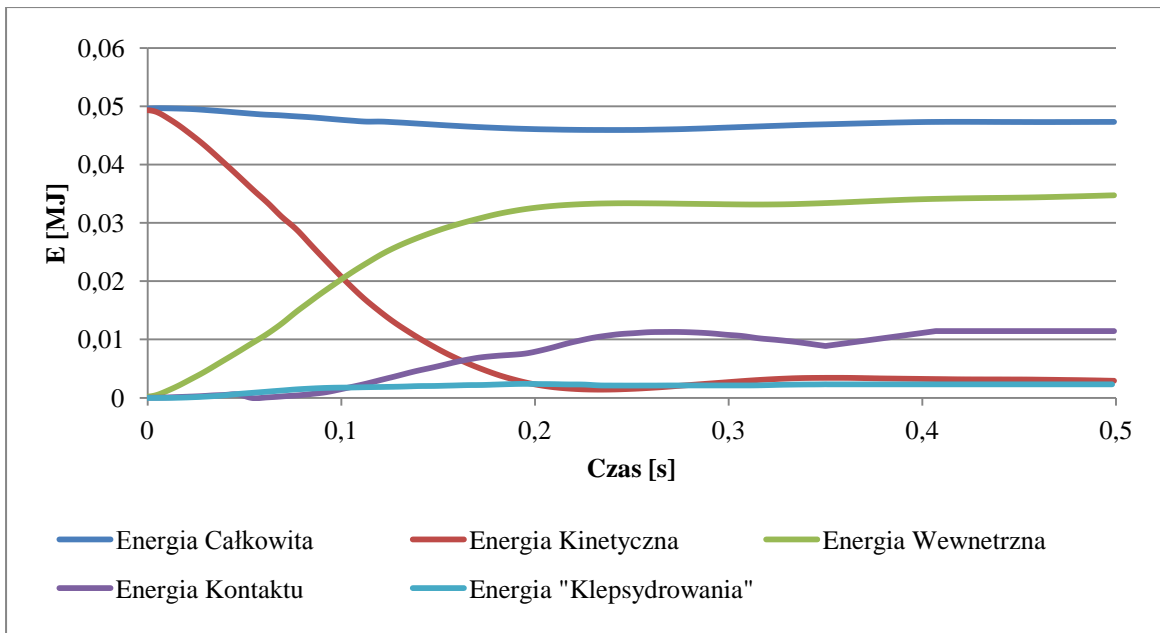


Rys. 45. Wartość współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI w funkcji czasu uzyskana z symulacji numerycznej dla słupa wykonanego z aluminium przy zderzeniu z prędkością 35 km/h

Wyznaczona wartość współczynnika THIV przy zderzeniu pojazdu z aluminiowym słupem oświetleniowym była równa 24,6 km/h.

Na podstawie analizy zderzeń pojazdu ze słupami oświetleniowymi wykonanymi z materiału kompozytowego oraz z aluminium przy prędkości 35km/h można stwierdzić, że wartości współczynnika ASI są znacznie niższe w wypadku słupów wykonanych z materiału kompozytowego. Wartości drugiego współczynnika bezpieczeństwa biernego THIV są jednak niższe dla słupów wykonanych z aluminium. Dodatkowo przy zderzeniu obie te konstrukcje zachowują się całkowicie inaczej. W wypadku słupów wykonanych z aluminium przy zderzeniu, zaobserwowano, że konstrukcja ta doznaje nieznacznego odkształcenia i nie stwarza zagrożenia dla innych uczestników ruchu, natomiast słup wykonany z materiału kompozytowego doznaje znacznego odkształcenia i po ustaniu wymuszenia może stwarzać zagrożenia dla innych osób będących w pobliżu tego zdarzenia.

Na podstawie bilansu energetycznego, służącego do analizy procesu pochłaniania energii oraz kontroli poprawności symulacji numerycznej przedstawionego na rys. 46 określono, że w trakcie zderzenia pochłonięte zostało 97% energii kinetycznej pojazdu. Dodatkowo określono, że wartość "energii klepsydrowania" w stosunku do maksymalnej wartości energii całkowitej wynosi 5,2%, co jest mniejsze od zalecanych wartości.



46. Bilans energetyczny symulacji numerycznej zderzenia pojazdu z aluminiowym słupem oświetleniowym z prędkością 35km/h

7. Wpływ grubości słupa oświetleniowego na wartość współczynników bezpieczeństwa biernego

7.1. Określenie minimalnej grubości ścianki słupa oświetleniowego

Minimalna grubość ścianki słupa oświetleniowego, spełniająca wymogi przedstawione w normach [68][69][70], została określona na podstawie symulacji numerycznej wykonanej w konwencji metody elementów skończonych. Jednym z głównych etapów przygotowania modelu obliczeniowego było określenie wartości obciążeń działających na analizowaną konstrukcję słupa oświetleniowego oraz miejsc ich przyłożenia. Słup oświetleniowy poddano obciążeniu stałemu wynikającemu z ciężaru własnego wszystkich elementów słupa oraz obciążeniom związanymi z ciśnieniem wiatru.

W celu określenia obciążeń związanych z wiatrem niezbędne jest przedstawienie podstawowych danych odnośnie do wiatru, które są zawarte w PN-77 B-02011[72]. W normie tej znajduje się mapa stref wiatrowych, przedstawiająca podział Polski na obszary, w których występują różne warunki mające wpływ na prędkość wiatru. Mapa stref wiatrowych przedstawiono na rys. 47, natomiast zestawienie charakterystycznych prędkości wiatru dla poszczególnych stref przedstawiono w tabeli 11.



Rys. 47. Mapa stref wiatrowych wg PN-77 B-02011 [85]

Tabela 11. Charakterystyczna prędkość wiatru wg PN-77 B-02011:1977/Az1:2009 [72]

Strefa wiatrowa	Wysokość nad poziomem morza – H [m]			
	H ≤ 300 [m]		H > 300 [m]	
	Prędkość wiatru			
	[km/h]	[m/s]	[km/h]	[m/s]
I	79,2	22	79,2[1+0,0006(H-300)]	22[1+0,0006(H-300)]
II	93,6	26	93,6	26
III	79,2	22	79,2[1+0,0006(H-300)]	22[1+0,0006(H-300)]

W celu wyznaczenia obciążeń działających na analizowaną konstrukcję słupa oświetleniowego, podzielono ją na odcinki wysokościowe o długości 1 [m]. Następnie każdy odcinek obciążono siłą naporu wiatru obliczoną z zależności [68]:

$$F_i = 1,4 * A_i * c_i * q(z) \quad (26)$$

gdzie:

F_i - siła naporu wiatru dla i-tego odcinka wysokościowego,

A_i - pole rzutu odcinka na płaszczyznę prostopadłą do kierunku wiatru,

c_i - współczynnik kształtu,

$q(z)$ - charakterystyczne ciśnienie wiatru.

Wartość 1,4, pojawiająca się w zależności 26, jest zalecaną wartością, o jaką należy powiększyć działającą na odcinek słupa siłę zgodnie z PN.

Charakterystyczne ciśnienie wiatru $q(z)$ [N/m²] wyznaczono na podstawie następującej zależności [68]

$$q(z) = \delta * \beta * f * C_{e_z} * q_{(10)} \quad (27)$$

gdzie:

δ - współczynnik efektu skali,

β - współczynnik dynamiczny, wyznaczany na podstawie okresu drgań własnych słupa z latarnią,

f - współczynnik topograficzny wynoszący dla analizowanego przypadku 1,

$C_{e(z)}$ - współczynnik ekspozycji wynikający z wysokości słupa oraz kategorii terenu,

$q_{(10)}$ - referencyjne ciśnienie prędkości wiatru,

➤ Współczynnik efektu skali δ

Wartość współczynnika efektu skali (δ) wyznaczana jest z następującej zależności [68]

$$\delta = 1 - 0,01h \quad (28)$$

gdzie:

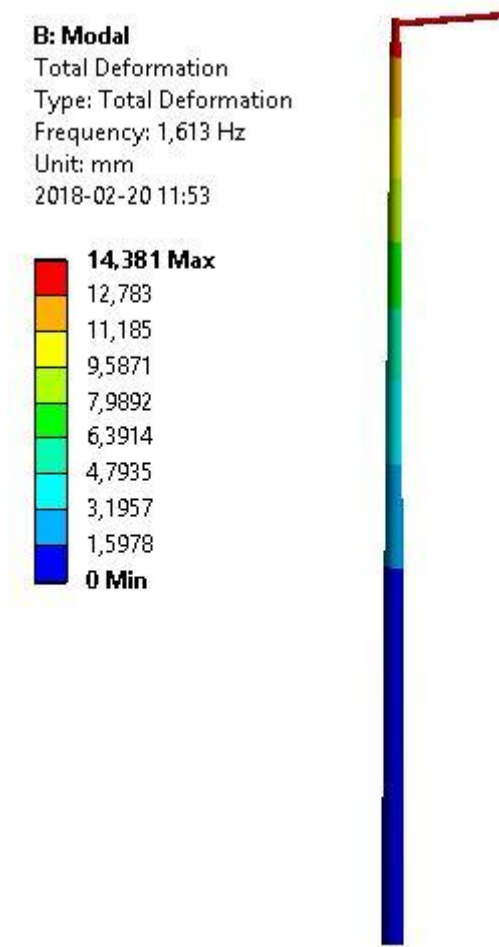
h - wysokość słupa [m]

➤ współczynnik dynamiczny β

W celu określenia współczynnika dynamicznego przeprowadzono analizę modalną z zastosowaniem symulacji numerycznej, która umożliwiła wyznaczenia okresu drgań własnych kompozytowego słupa oświetleniowego z latarnią. Częstotliwości drgań własnych oraz maksymalna deformacja słupa oświetleniowego przy wymuszeniu pierwszą częstotliwością rezonansową wyznaczone na podstawie symulacji numerycznej przedstawiono odpowiednio w tabeli 12 oraz na rys. 48.

Tabela 12. Częstotliwości drgań własnych kompozytowego słupa oświetleniowego

Częstotliwość [Hz]	
1	1,613
2	1,6676
3	7,5488
4	7,6517
5	14,339
6	14,807



Rys. 48. Rozkład przemieszczeń konstrukcji kompozytowego słupa oświetleniowego przy wymuszeniu pierwszą częstotliwością drgań własnych

Na podstawie znajomości okresu drgań własnych określono, że wartość współczynnika β dla analizowanego przypadku będzie równa 0,65

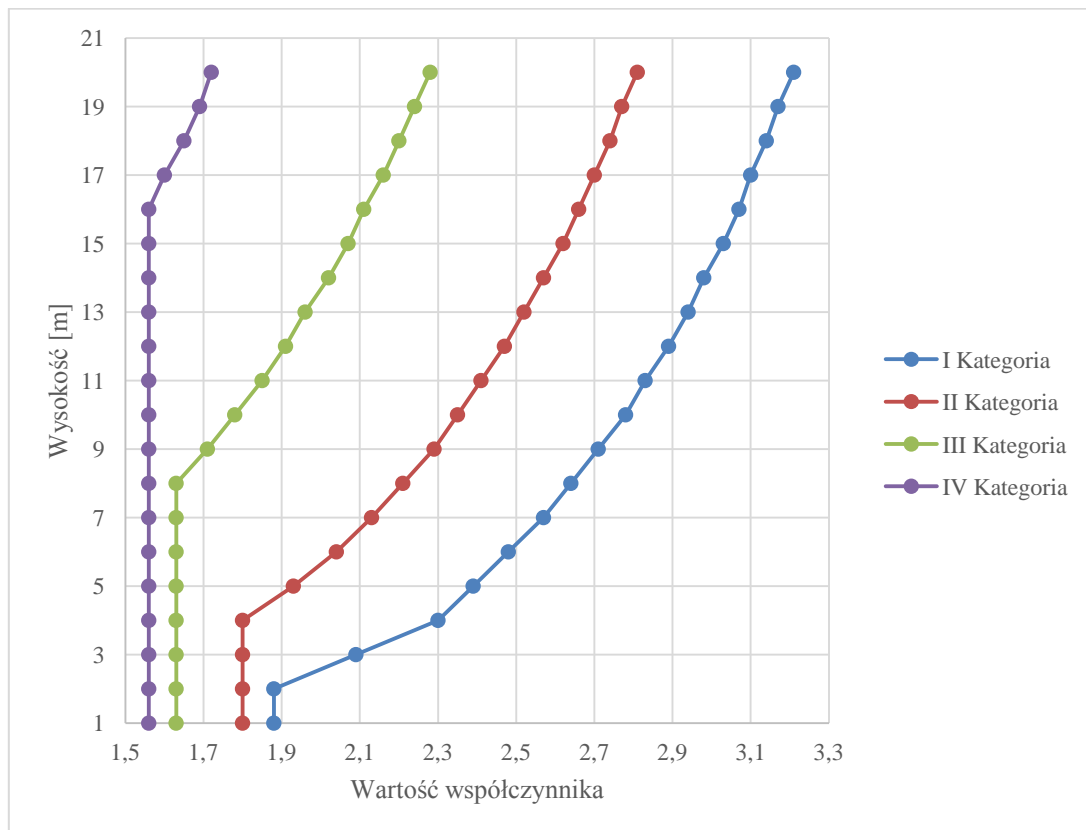
- współczynnik ekspozycji $C_{e(z)}$

Wartość współczynnika ekspozycji ma na celu określenie zmienności ciśnienia wiatru w zależności od kategorii terenu oraz wysokości konstrukcji nad poziomem morza. Kategorię terenu należy ustalić zgodnie z przewidzianą lokalizacją słupa na podstawie danych przedstawionych w tabeli 13.

Tabela 13 Kategorie terenu wg EN 40-3-1:2013

Kategoria	Opis
I	Tereny równinne bez przeszkód. Otwarte wzburzone morze, Tereny przybrzeżne wokół jezior, odsłonięte na odcinku minimum 5 km pod wiatr.
II	Tereny wiejskie, gdzie występują pojedyncze zabudowania rolnicze lub drzewa.
III	Stale obszary leśne oraz tereny podmiejskie lub przemysłowe.
IV	Tereny miejskie, których przeciętna wysokość przekracza 15m, a co najmniej 15% powierzchni stanowią budynki.

Wykres przedstawiający zmianę współczynnika ekspozycji w zależności od kategorii terenu oraz wysokości słupa przedstawiono na rys. 49.



Rys. 49. Wartość współczynnika ekspozycji w zależności od wysokości oraz kategorii terenu wg PN-EN 40-3-1:2013

➤ referencyjne ciśnienie prędkości wiatru $q_{(10)}$

Wartość referencyjnego ciśnienia prędkości wiatru $q_{(10)}$ wyznacza się z zależności przedstawionej poniżej [68]:

$$q_{(10)} = 0,5 * \rho * (C_s)^2 * V_{ref}^2 \quad (29)$$

gdzie:

V_{ref}^2 - wartość podstawowa prędkości referencyjnej na wysokości 10 m nad poziomem morza, uzyskiwana z map wiatrowych,

ρ - gęstość powietrza,

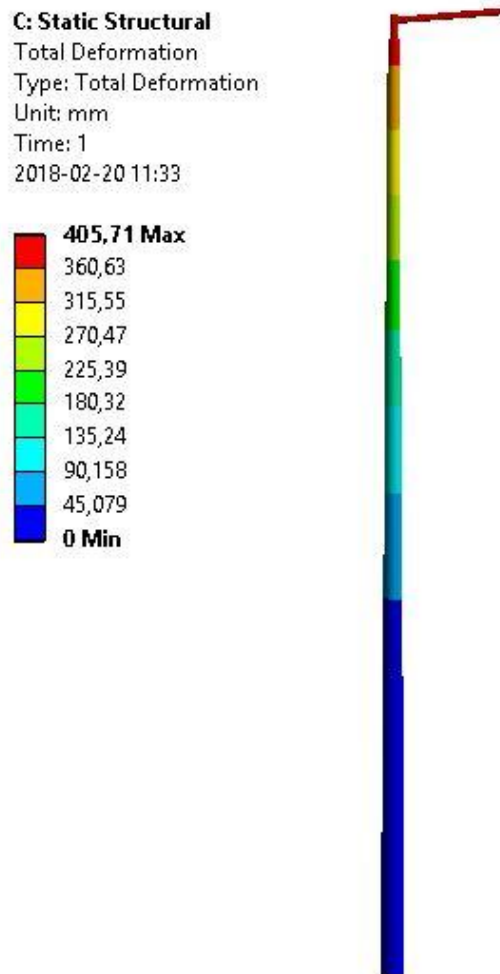
C_s - współczynnik konwersji, który dla słupów oświetleniowych zaleca się przyjmować $\sqrt{0,92}$.

Zestawienie wartości wszystkich parametrów przedstawionych w tym rozdziale oraz sił działających na poszczególne odcinki kompozytowego słupa oświetleniowego ilustruje tabela 14.

Tabela 14. Zestawienie parametrów oraz sił działających na poszczególne odcinki kompozytowego słupa oświetleniowego

$z_{(i)}$ [m]	$C_{e(z)}$	$q_{(z)}$ [Pa]	$A_{(i)}$ [m]	$C_{(i)}$	$F_{(i)}$ [N]
1	1,8	316,8	0,185	1	58,6
2	1,8	316,8	0,169	1,05	56,2
3	1,8	316,8	0,153	1,1	53,3
4	1,8	316,8	0,137	1,2	52,2
5	1,93	339,7	0,1205	1,2	49,1
6	2,04	359	0,104	1,2	44,8
7	2,13	374,9	0,088	1,2	39,6
Wspornik	2,21	388,9	0,0078	1,2	3,6
Latarnia	2,21	388,9	0,07275	1	27,3

Dla aktualnie wykorzystywanej grubości słupa oświetleniowego równej 4mm zostało określone maksymalne ugięcie (rys. 50).



Rys. 50. Ugięcie kompozytowego słupa oświetleniowego o grubości ścianki 4mm pod wpływem obciążenia wiatrem

Wyniki uzyskane z symulacji porównano z maksymalnym dopuszczalnym ugięciem określonym przez PN-EN 40-3-3, które przedstawiono w tabeli 15.

Tabela 15. Maksymalne ugięcie [70]

Klasa	Maksymalne ugięcie
1	0,04 (h+w)
2	0,06 (h+w)
3	0,1 (h+w)

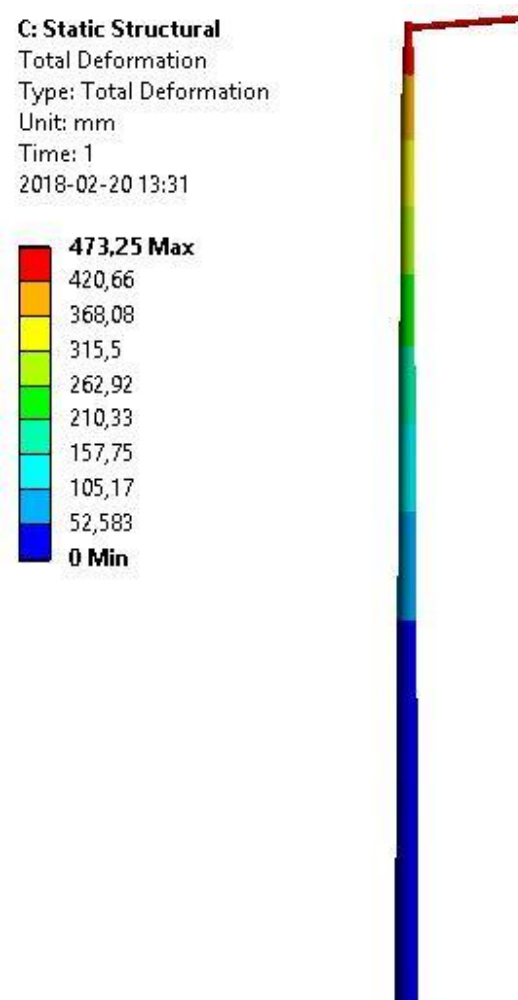
gdzie:

h - nominalna wysokość słupa oświetleniowego [m]

w - wysięg wspornika [m]

Na podstawie symulacji określono, że dana konstrukcja kompozytowego słupa oświetleniowego spełnia wymogi klasy 2 dotyczącej maksymalnego, dopuszczalnego ugięcia. Wytrzymałość słupa oświetleniowego sprawdzona została na podstawie kryterium maksymalnych naprężeń ma zastosowanie w materiałach anizotropowych i ortotropowych [43].

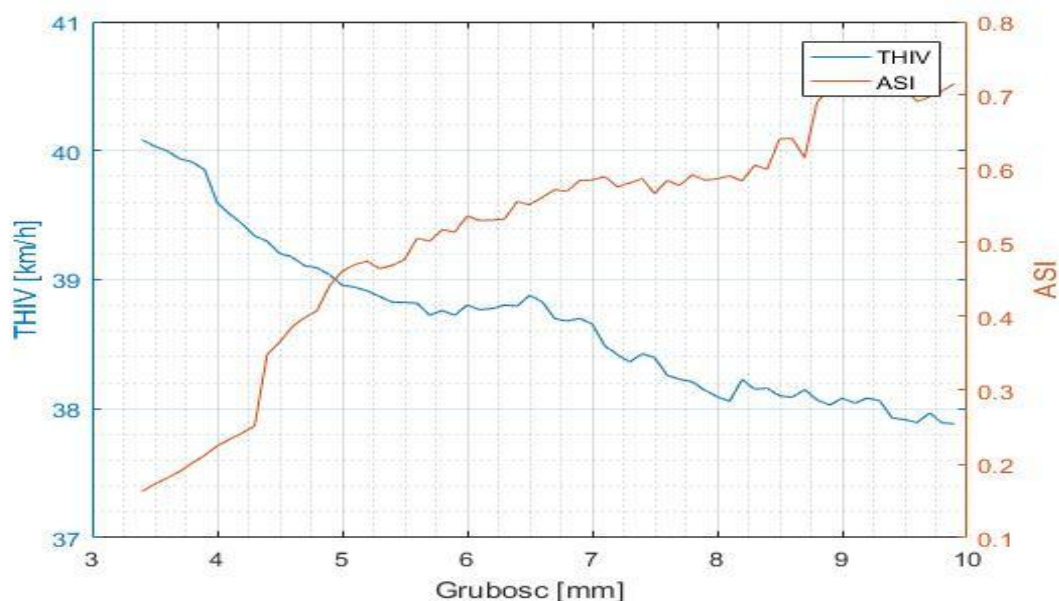
W celu określenia minimalnej grubości kompozytowego słupa oświetleniowego, spełniającej zarówno kryteria wytrzymałościowe, jak i kryterium związane z maksymalnym ugięciem, przeprowadzono szereg analiz numerycznych. Na podstawie testów wirtualnych określono, że minimalna grubość ścianki słupa kompozytowego wynosi 3,4mm. Maksymalne ugięcie słupa przy grubości ścianki równej 3,4mm przedstawiono na rys. 51.



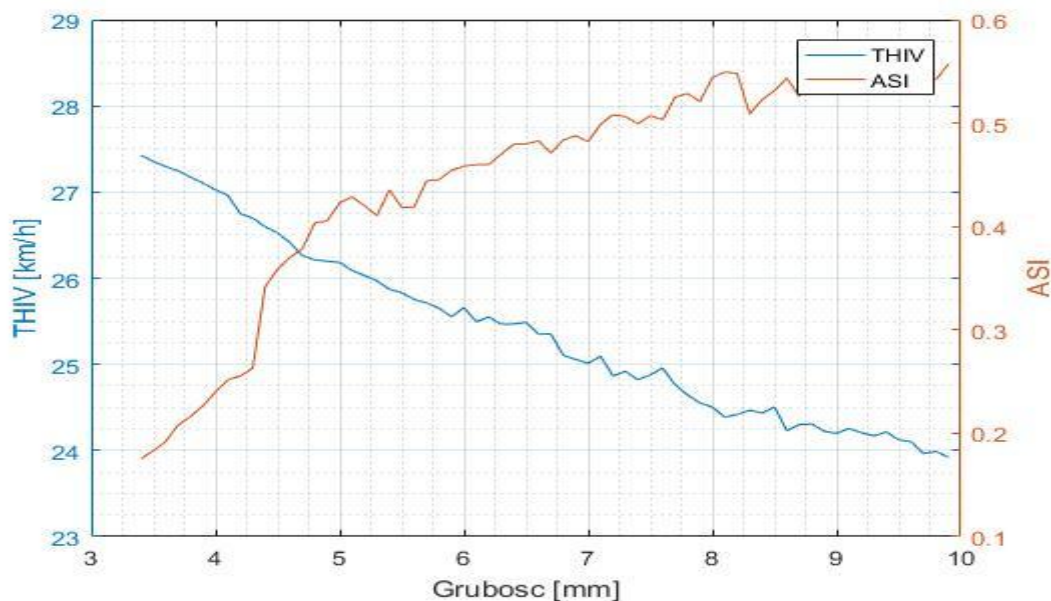
Rys. 51. Ugięcie kompozytowego słupa oświetleniowego o grubości ścianki 3,4mm pod wpływem obciążenia wiatrem

7.2. Wpływ grubości ścianki kompozytowego słupa oświetleniowego na wartości współczynników bezpieczeństwa biernego ASI i THIV

W celu określenia wpływu grubości ścianki kompozytowego słupa oświetleniowego na wartości współczynników bezpieczeństwa biernego ASI oraz THIV przeprowadzono szereg symulacji numerycznych. Symulacje te były przeprowadzone przy grubości ścianki słupa w przedziale od 3,4 do 10 mm. Dolna granica przedziału wynikała z minimalnej grubości słupa oświetleniowego spełniającej wymagania narzucone przez polskie normy (wyznaczona w rozdziale 7.1). Wykres przedstawiający wpływ grubości ścianki słupa oświetleniowego na wartości współczynników ASI oraz THIV przedstawiono na rys. 52 oraz rys. 53. Na rys. 52 pokazano wartości uzyskane w trakcie zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym przy prędkości 50 km/h, natomiast na rys. 53 wartości przy zderzeniu z prędkością 35 km/h.



Rys. 52. Wpływ grubości ścianki słupa oświetleniowego na wartość współczynników ASI oraz THIV dla zderzenia z prędkością 50 km/h



Rys. 53. Wpływ grubości ścianki słupa oświetleniowego na wartość współczynników ASI oraz THIV dla zderzenia z prędkością 35km/h

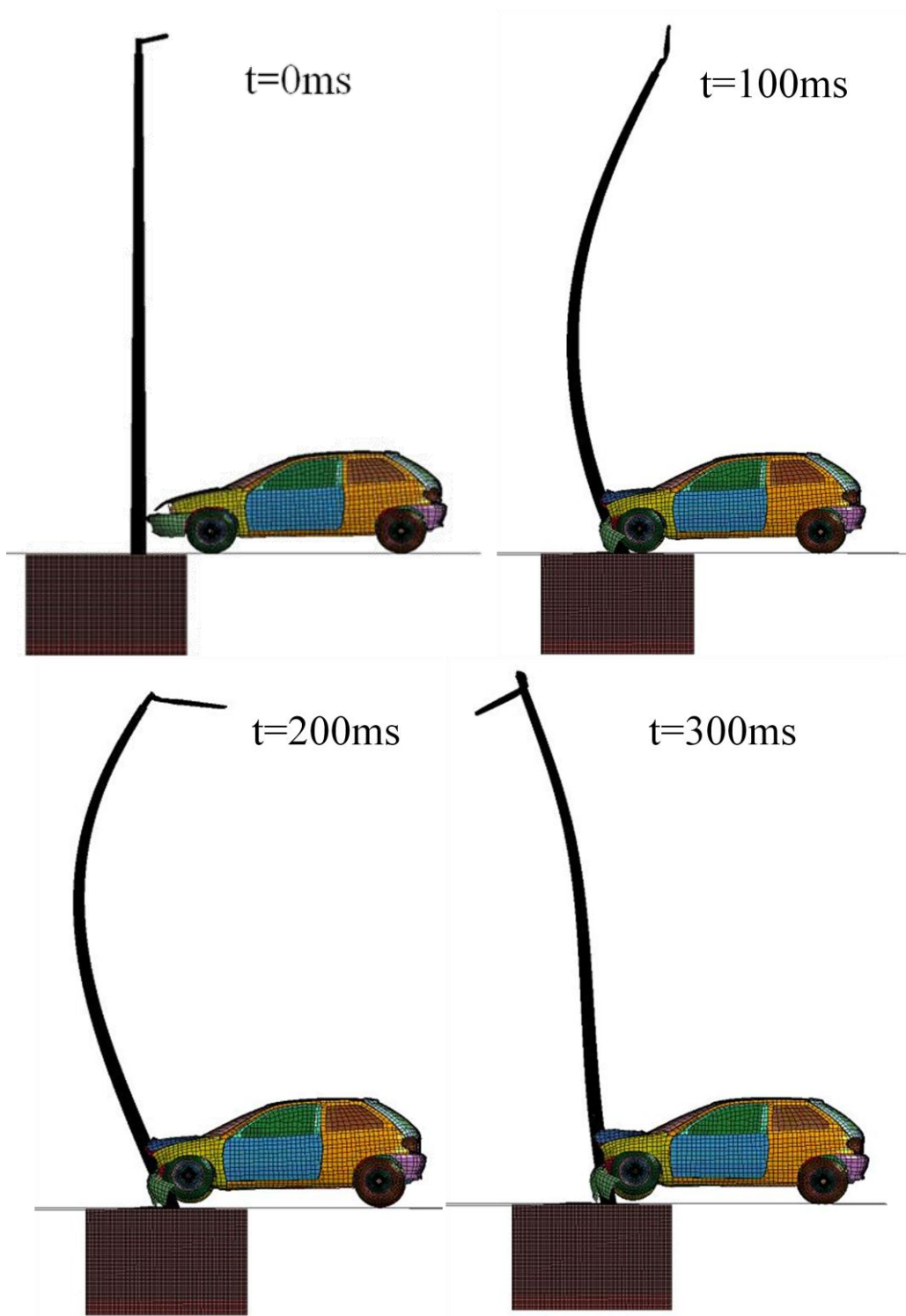
Na podstawie przeprowadzonych analiz numerycznych stwierdzono, że wraz ze zmniejszaniem grubości ścianki słupa oświetleniowego maleje wartość współczynnika ASI, natomiast wartość współczynnika THIV wzrasta. W odwrotnym przypadku, czyli przy zwiększaniu grubości ścianki słupa oświetleniowego wartość współczynnika ASI rośnie, natomiast współczynnika THIV maleje. W celu określenia najlepszego rozwiązania, przy założeniu, że oba współczynniki są tak samo ważne, określono wartość funkcji w postaci:

$$\text{Współczynniki_bezpieczeństwa} = 0,5 \cdot \text{ASI} + 0,5 \cdot \text{THIV} \quad (30)$$

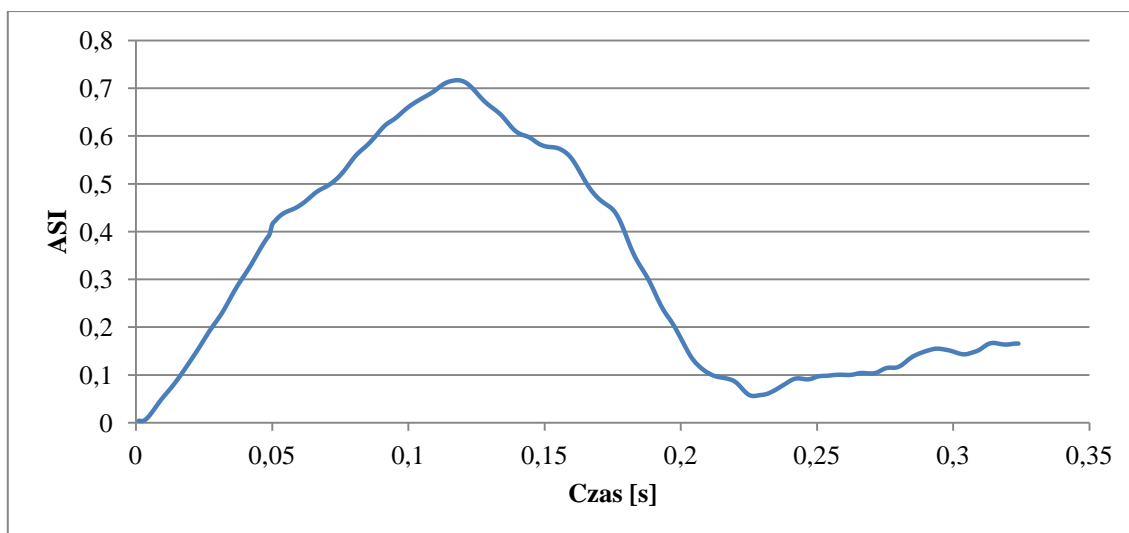
Ze względu na znaczne różnice pomiędzy wartościami współczynników bezpieczeństwa biernego zastosowano normalizację kryteriów składowych [82], umożliwiło to sprowadzenie wartości współczynników ASI oraz THIV do wartości 0,5. Na podstawie uzyskanych wyników określono, że najniższa wartość funkcji (30), zarówno dla prędkości 35 km/h jak i 50km/h, została osiągnięta przy grubości 3,4mm, która była minimalną grubością ścianki spełniającą kryteria przedstawione w rozdziale 7.1.

W celu zobrazowania zachowania słupa oświetleniowego w zależności od grubości ścianki przedstawiono analizę jakościową wyników symulacji w dwóch przypadkach. Jeden przypadek dotyczył grubości ścianki słupa oświetleniowego, u której

osiągnięto najmniejszą wartość współczynnika ASI i która miała najniższą wartość przyjętej funkcji. Drugi przypadek dotyczył sytuacji, w której wartość współczynnika THIV była najmniejsza.



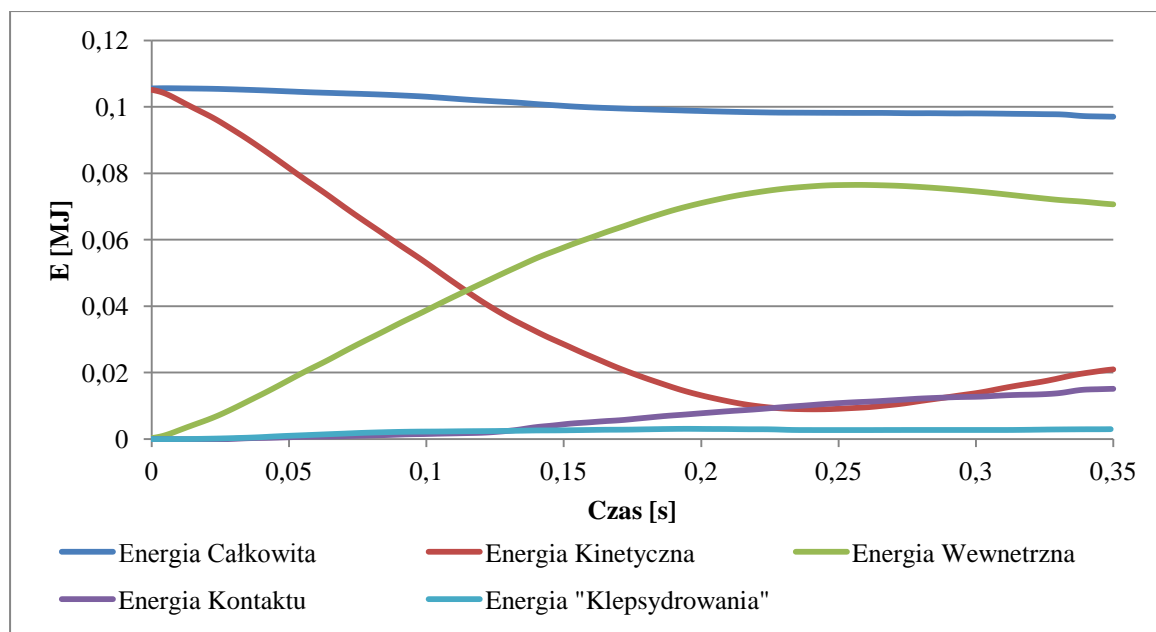
Rys. 54. Analiza jakościowa zderzenia pojazdu z kompozytowym słupem oświetleniowym o grubości ścianki 9,9mm przy prędkości 50 km/h dla chwil czasu $t=0\text{ ms}$, $t=100\text{ ms}$, $t=200\text{ ms}$ oraz $t=300\text{ ms}$



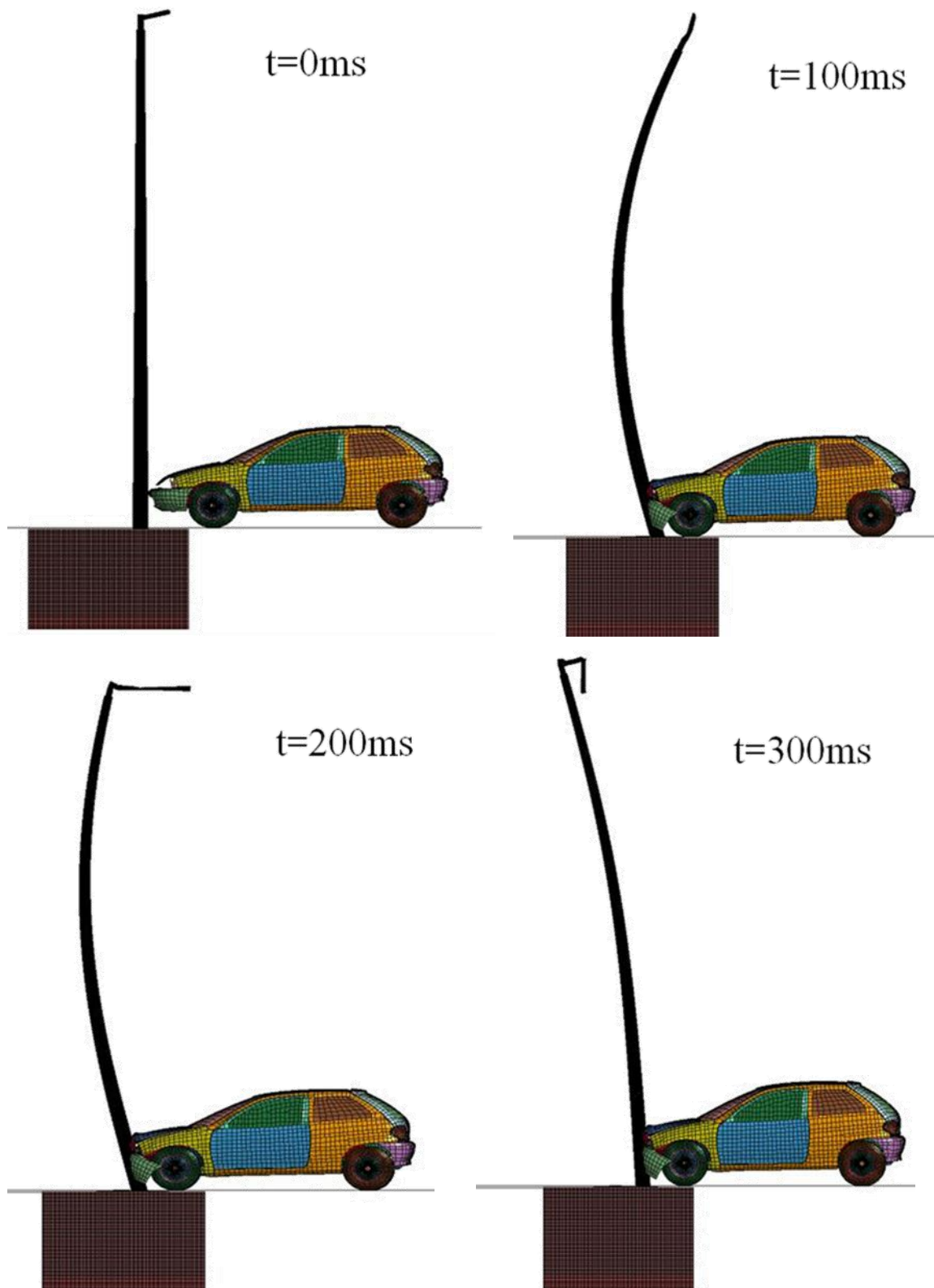
Rys. 55. Wartość współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI w funkcji czasu uzyskana z symulacji numerycznej dla słupa o grubości ścianki 9,9 mm przy zderzeniu z prędkością 50 km/h

Przy zderzeniu pojazdu ze słupem oświetleniowym o grubości 9,9 mm można zaobserwować, że uzyskane wartości współczynnika ASI są zbliżone do wartości, jakie uzyskano dla słupa aluminiowego o grubości ścianki równej 4mm. W przypadku współczynnika THIV jego wartość została zredukowana w stosunku do wartości uzyskanej przy zderzeniu ze słupem o grubości ścianki równej 4mm, jednak zmiana wartości była nieznaczna i wynosiła około 3,5%. Zmieniło się natomiast zachowanie słupa oświetleniowego w trakcie zderzenia, konstrukcja o grubości ścianki 9,9mm nie ulega znacznej deformacji w trakcie zderzenia i nie powoduje dodatkowego niebezpieczeństwa dla osób znajdujących się w niewielkiej odległości od tego zdarzenia.

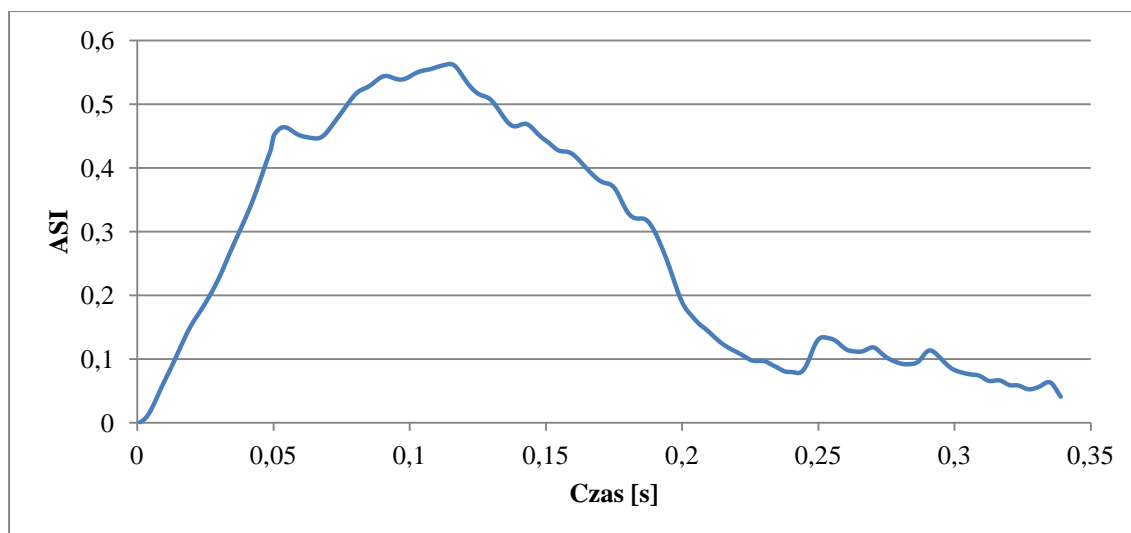
Na podstawie bilansu energetycznego, służącego do analizy procesu pochłaniania energii oraz kontroli poprawności symulacji numerycznej przedstawionego na rys. 56 określono, że w trakcie zderzenia pochłonięte zostało 91% energii kinetycznej pojazdu. Na wykresie można zaobserwować wzrost wartości energii kinetycznej występujący od czasu $t=250\text{ms}$ spowodowany odbiciem pojazdu od słupa i zmianą kierunku wektora prędkości. Dodatkowo określono, że wartość "energii klepsydrowania" w stosunku do maksymalnej wartości energii całkowitej wynosi 3,1%, co jest mniejsze od zalecanych wartości.



Rys. 56. Bilans energetyczny symulacji numerycznej zderzenia pojazdu z kompozytowym słupem oświetleniowym o grubości ścianki 9,9mm z prędkością 50km/h



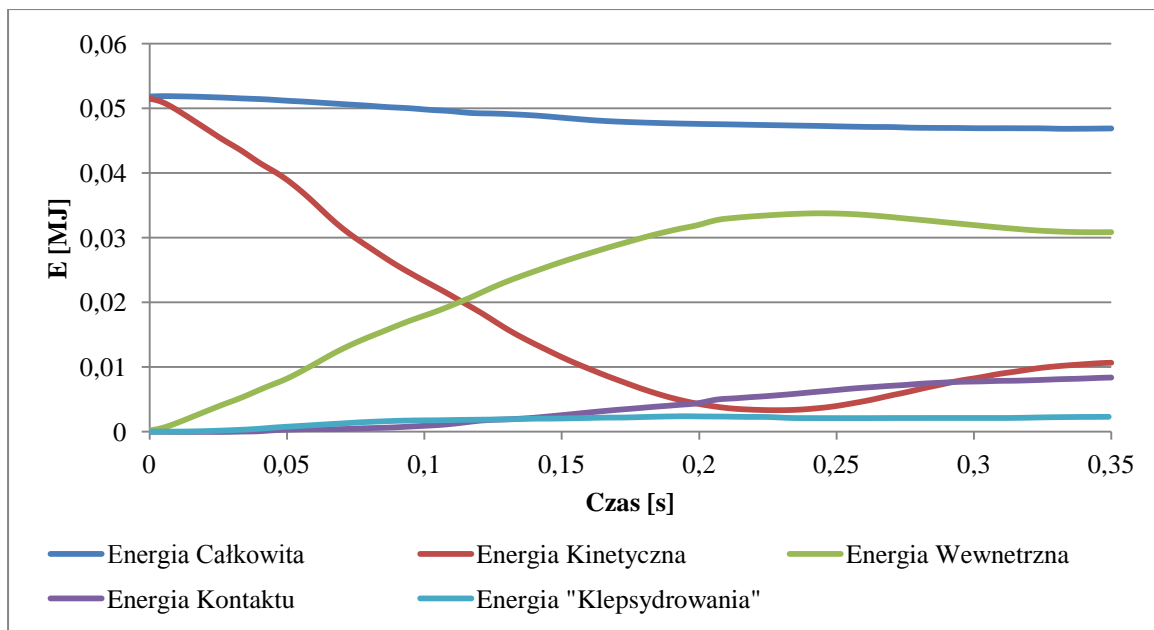
Rys. 57. Analiza jakościowa zderzenia pojazdu z kompozytowym słupem oświetleniowym o grubości ścianki 9,9mm przy prędkości 35 km/h dla chwil czasu $t=0\text{ ms}$, $t=100\text{ ms}$, $t=200\text{ ms}$ oraz $t=300\text{ ms}$



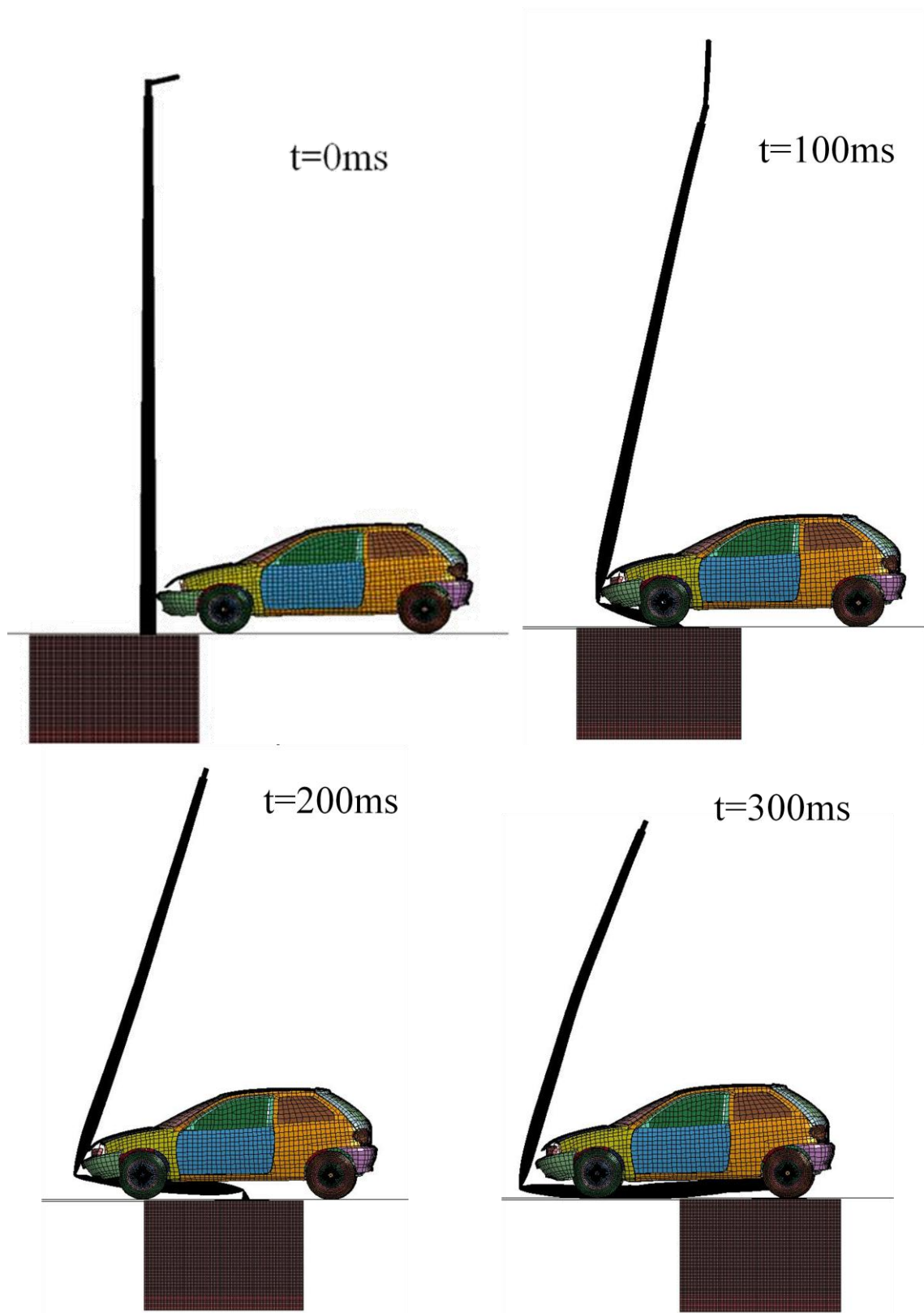
Rys. 58. Wartość współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI w funkcji czasu uzyskana z symulacji numerycznej dla słupa o grubości ścianki 9,9 mm przy zderzeniu z prędkością 35 km/h

Przy zderzeniu z prędkością 35 km/h zaobserwowano dokładnie takie same zależności, jak przy zderzenia z prędkością 50 km/h.

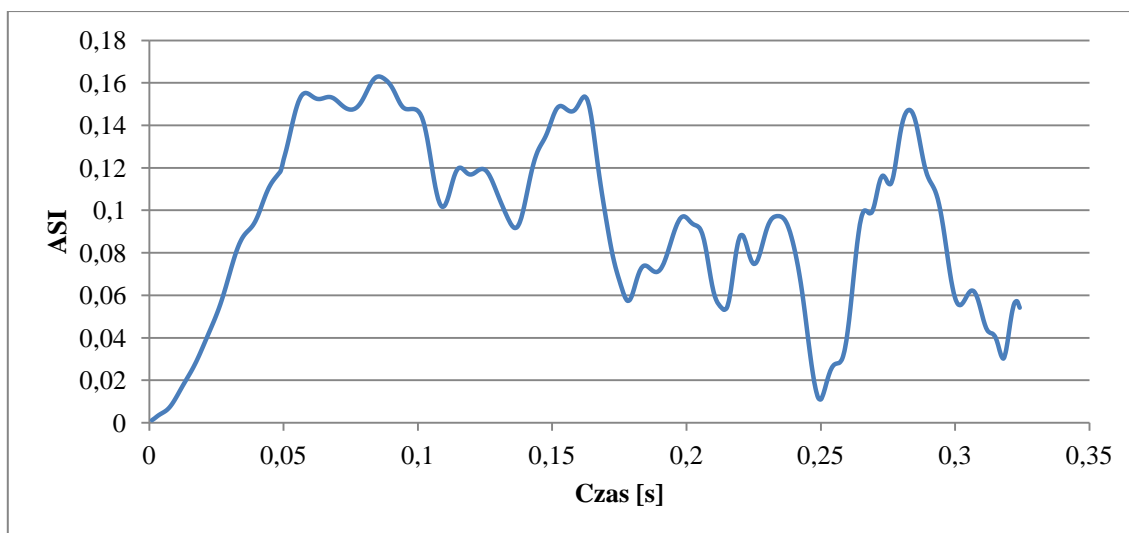
Na podstawie bilansu energetycznego, służącego do analizy procesu pochłaniania energii oraz kontroli poprawności symulacji numerycznej przedstawionego na rys. 59 określono, że w trakcie zderzenia pochłonięte zostało 93% energii kinetycznej pojazdu. Na wykresie można zaobserwować wzrost wartości energii kinetycznej występujący od czasu $t=250\text{ms}$ spowodowany odbiciem pojazdu od słupa i zmianą kierunku wektora prędkości, taką samą zależność zaobserwowano dla zderzenia z prędkością 50km/h. Dodatkowo określono, że wartość "energii klepsydrowania" w stosunku do maksymalnej wartości energii całkowitej wynosi 5%, co jest mniejsze od zalecanych wartości.



Rys. 59. Bilans energetyczny symulacji numerycznej zderzenia pojazdu z kompozytowym słupem oświetleniowym o grubości ścianki 9,9mm z prędkością 35km/h



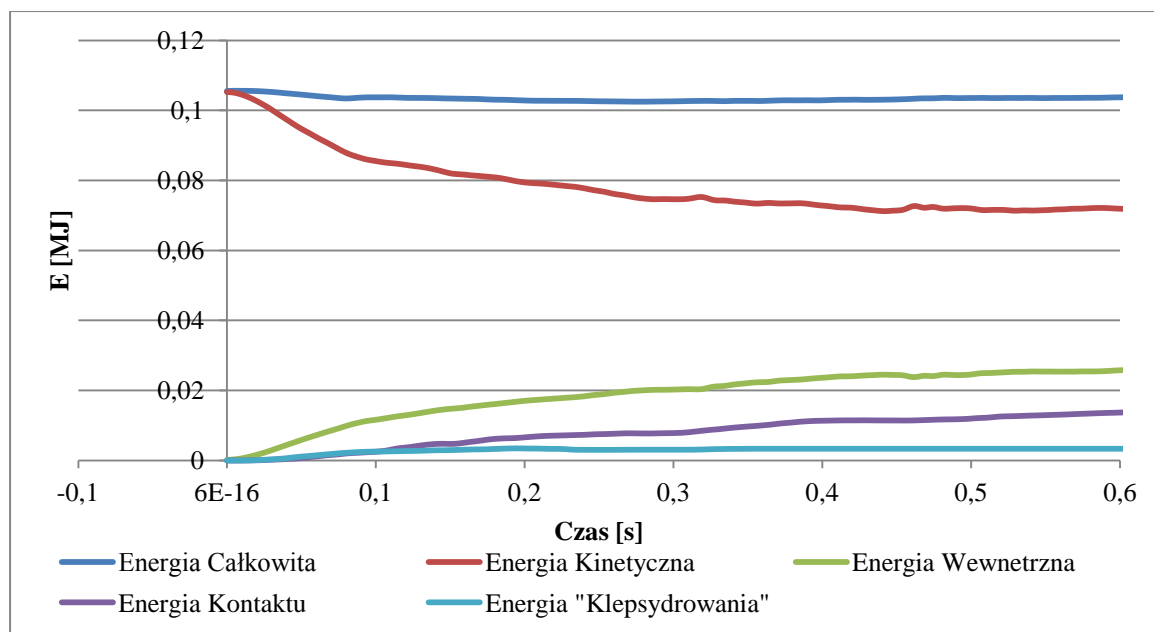
Rys. 60. Analiza jakościowa zderzenia pojazdu z kompozytowym słupem oświetleniowym o grubości ścianki 3,4 mm przy prędkości 50 km/h dla chwil czasu $t=0$ ms, $t=100$ ms, $t=200$ ms oraz $t=300$ ms



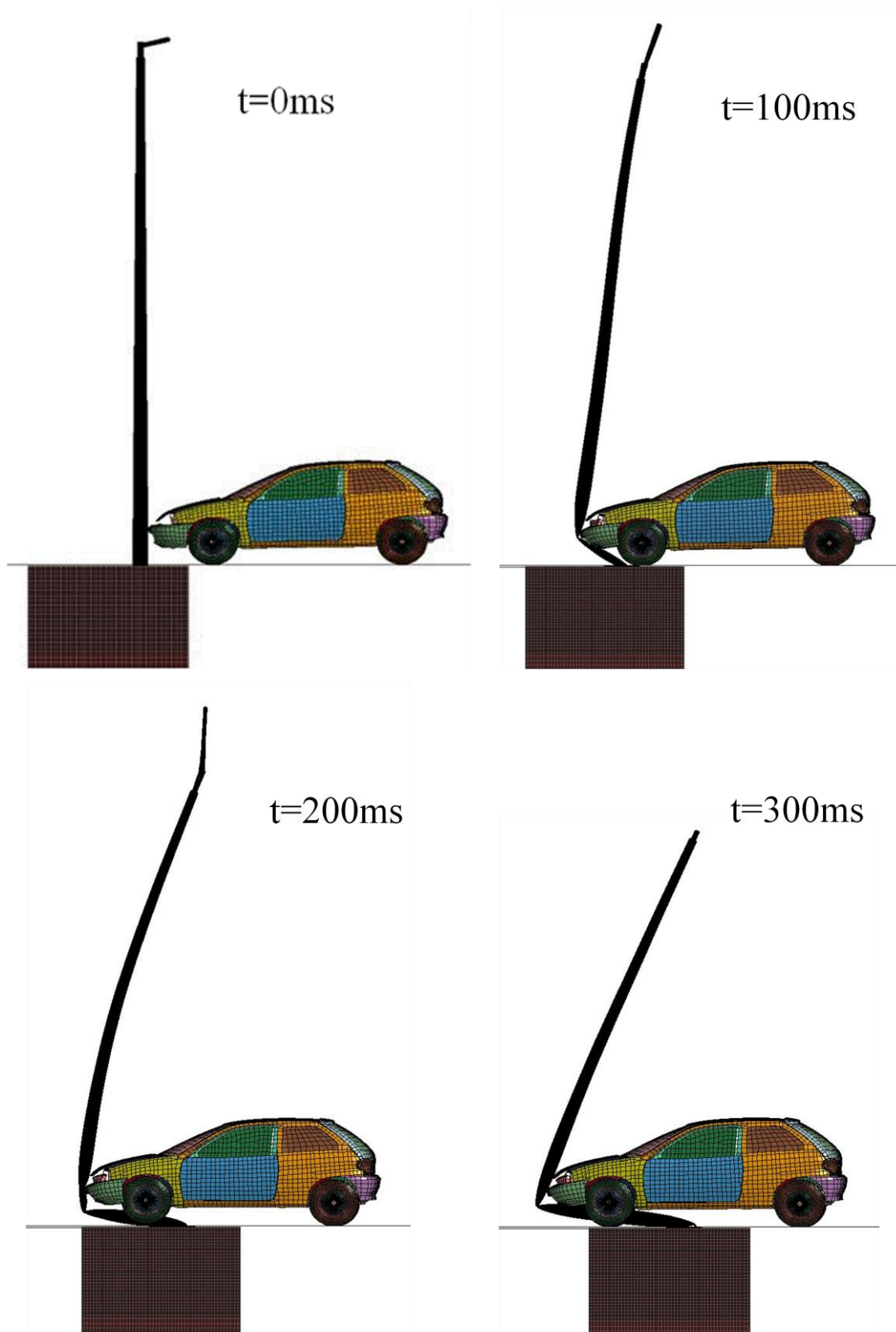
Rys. 61. Wartości współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI w funkcji czasu uzyskane z symulacji numerycznej dla słupa o grubości ścianki 3,4 mm przy zderzeniu z prędkością 50 km/h

Obserwując zderzenie pojazdu ze słupem oświetleniowym o grubości ścianki 3,4mm można zauważyć, że wartość współczynnika ASI znacznie spadła w odniesieniu do słupa o grubości ścianki 4mm. Zmiana wartości tego współczynnika wynosi około 25%. Utrzymuje się ona na wysokim poziomie przez długi czas, co może stwarzać dyskomfort dla kierowcy i pasażerów. Biorąc pod uwagę współczynnik THIV, można zaobserwować, że wartość, dotycząca słupa o grubości ścianki 3,4 mm, wzrosła, jednak zmiana ta była równa około 2% i uzyskana wartość w dalszym ciągu mieściła się w limitach narzuconych przez polskie normy.

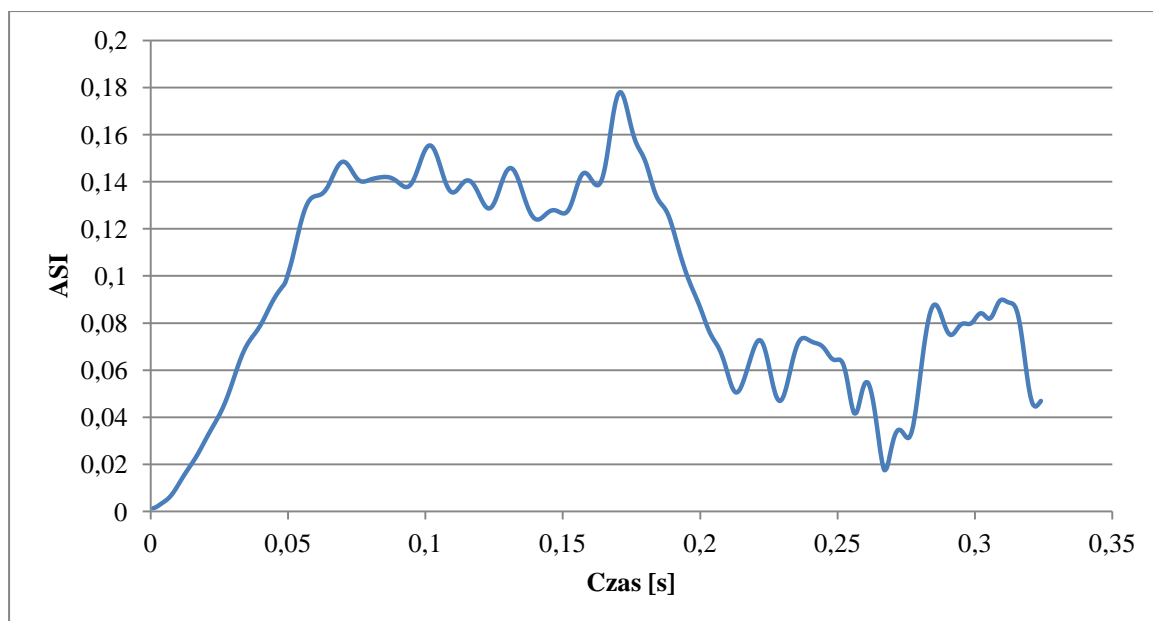
Na podstawie bilansu energetycznego, służącego do analizy procesu pochłaniania energii oraz kontroli poprawności symulacji numerycznej przedstawionego na rys. 62 określono, że w trakcie zderzenia pochłonięte zostało 37% energii kinetycznej pojazdu. Dodatkowo określono, że wartość "energii klepsydrowania" w stosunku do maksymalnej wartości energii całkowitej wynosi 3,3%, co jest mniejsze od zalecanych wartości.



Rys. 62. Bilans energetyczny symulacji numerycznej zderzenia pojazdu z kompozytowym słupem oświetleniowym o grubości ścianki 3,4mm z prędkością 50km/h



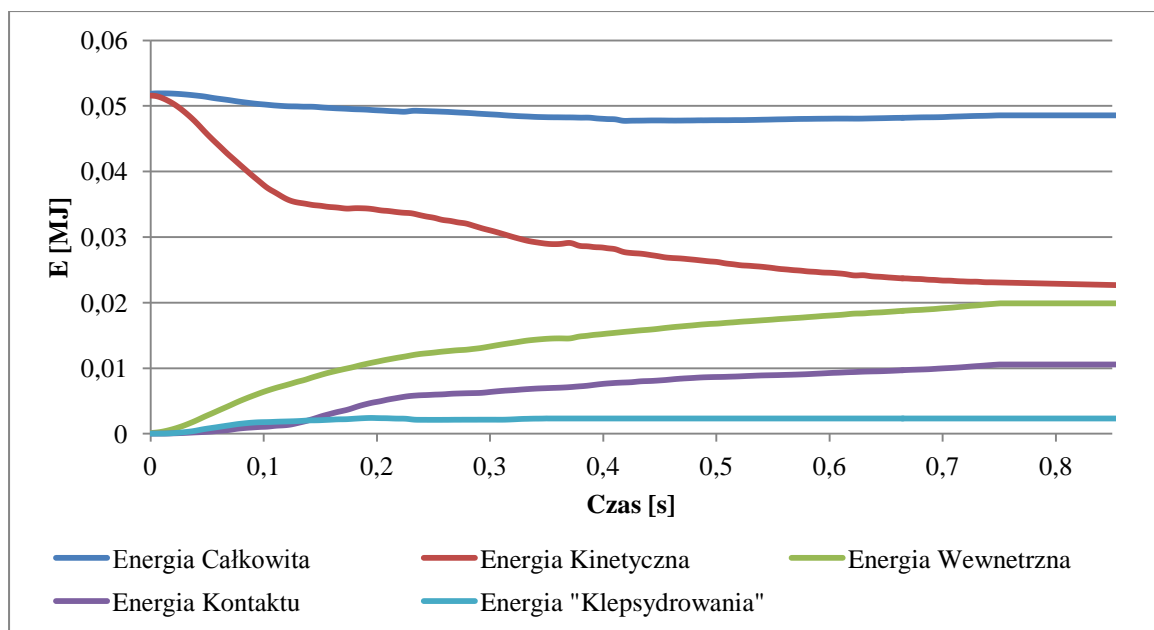
Rys. 63. Analiza jakościowa zderzenia pojazdu z kompozytowym słupem oświetleniowym o grubości ścianki 3,4mm przy prędkości 35 km/h dla chwil czasu $t=0\text{ ms}$, $t=100\text{ ms}$, $t=200\text{ ms}$ oraz $t=300\text{ ms}$



Rys. 64. Wartości współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI w funkcji czasu uzyskane z symulacji numerycznej dla słupa o grubości ścianki 3,4 mm przy zderzeniu z prędkością 35km/h

Przy zderzeniu z prędkością 35 km/h zaobserwowano takie same zależności jak przy zderzeniu z prędkością 50 km/h. Wartość współczynnika ASI w odniesieniu do zderzenia ze słupem o grubości ścianki 4 mm znacznie spadła (około 30). Zaobserwowano również niewielki wzrost wartości współczynnika THIV..

Na podstawie bilansu energetycznego, służącego do analizy procesu pochłaniania energii oraz kontroli poprawności symulacji numerycznej przedstawionego na rys. 65 określono, że w trakcie zderzenia pochłonięte zostało 56% energii kinetycznej pojazdu. Dodatkowo określono, że wartość "energii klepsydrowania" w stosunku do maksymalnej wartości energii całkowitej wynosi 4,8%, co jest mniejsze od zalecanych wartości.



Rys. 65. Bilans energetyczny symulacji numerycznej zderzenia pojazdu z kompozytowym słupem oświetleniowym o grubości ścianki 3,4mm z prędkością 35km/h

8. Wpływ położenia środka masy słupa oświetleniowego na wartość współczynników bezpieczeństwa biernego ASI i THIV

8.1. Badania modelowe

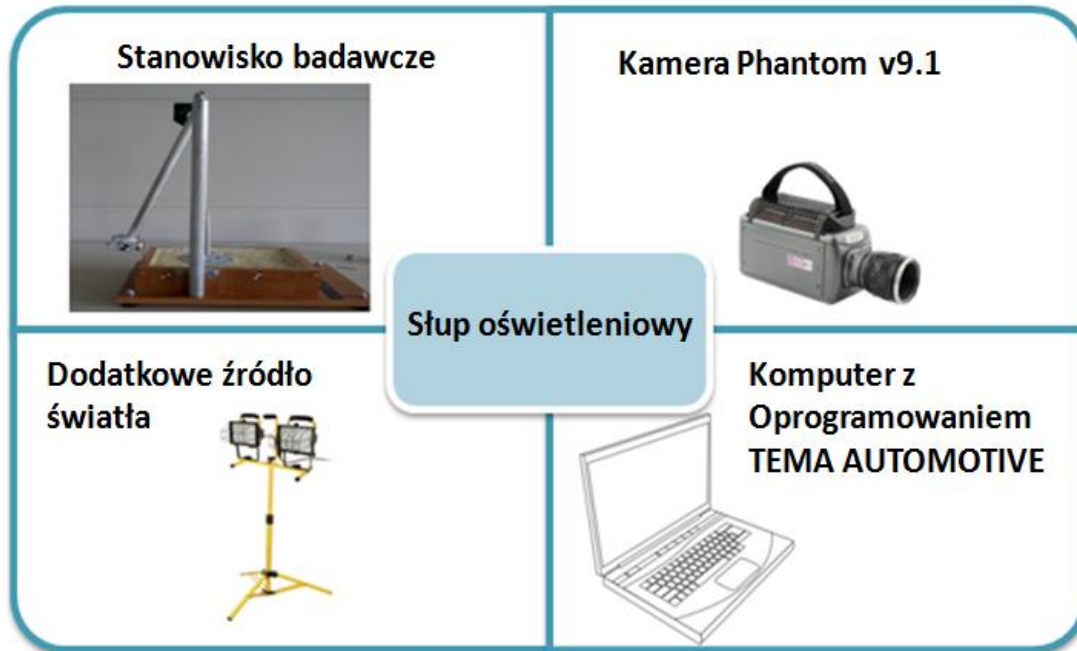
W celu weryfikacji założonej hipotezy, mówiącej o wpływie położenia środka masy słupa oświetleniowego na współczynniki bezpieczeństwa biernego, przeprowadzono badania na stanowisku mającym symulować zderzenie pojazdu ze słupem oświetleniowym. Stanowisko powstało podczas realizacji pracy magisterskiej w Instytucie Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej. Promotorem był dr inż. Mariusz Pawlak. Konstrukcję urządzenia badawczego wzorowano na młocie Charpy`ego, który umożliwia badanie odporności materiału na wymuszenie impulsowe. Strukturę urządzenia przedstawiono na rys. 66.



Rys. 66. Wizualizacja stanowiska badawczego

W celu wyznaczenia parametrów kinematycznych oraz współczynnika ASI występujących w trakcie zderzenia zastosowano kamerę do rejestracji zjawisk szybkozmiennych Phantom v.9.1 (umożliwiająca rejestrację obrazów z częstotliwością

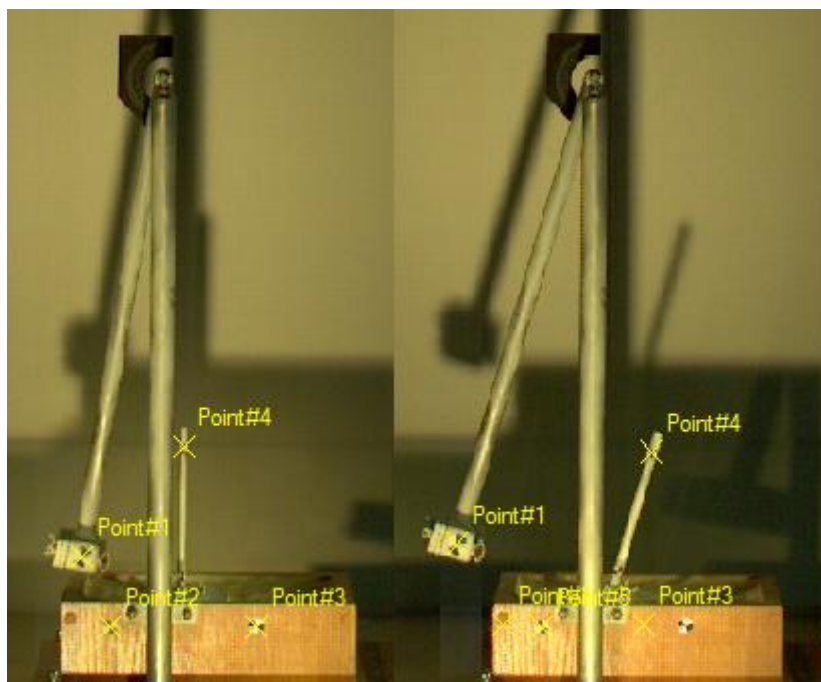
150000Hz [103]) oraz oprogramowanie do analizy ruchu w testach zderzeniowych TEMA Automotive. W badaniach realizowanych w ramach tej pracy częstotliwość nagrywania wynosiła 3500Hz. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 67.



Rys. 67. Schemat stanowiska badawczego

Schemat stanowiska pomiarowego wraz z zaznaczonymi markerami, umożliwiającymi wyznaczenie wielkości kinematycznych w oprogramowaniu TEMA Automotive przedstawiono na rys. 68. Wśród analizowanych punktów można wyróżnić:

- Point 1 - punkt znajdujący się na powierzchni wahadła,
- Point 2, 3 - punkty umożliwiające określenie skali i przeliczenie wartości z pikseli na jednostki układu SI,
- Point 4 - punkt znajdujący się na powierzchni słupa.



Rys. 68. Schemat stanowiska pomiarowego wraz z zaznaczonymi punktami pomiarowymi

Taki sposób rozmieszczenia punktów pomiarowych umożliwił wyznaczenie wartości współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI, wartość energii uderzenia, określenie sposobu zachowania słupa oraz wahadła w trakcie zderzenia.

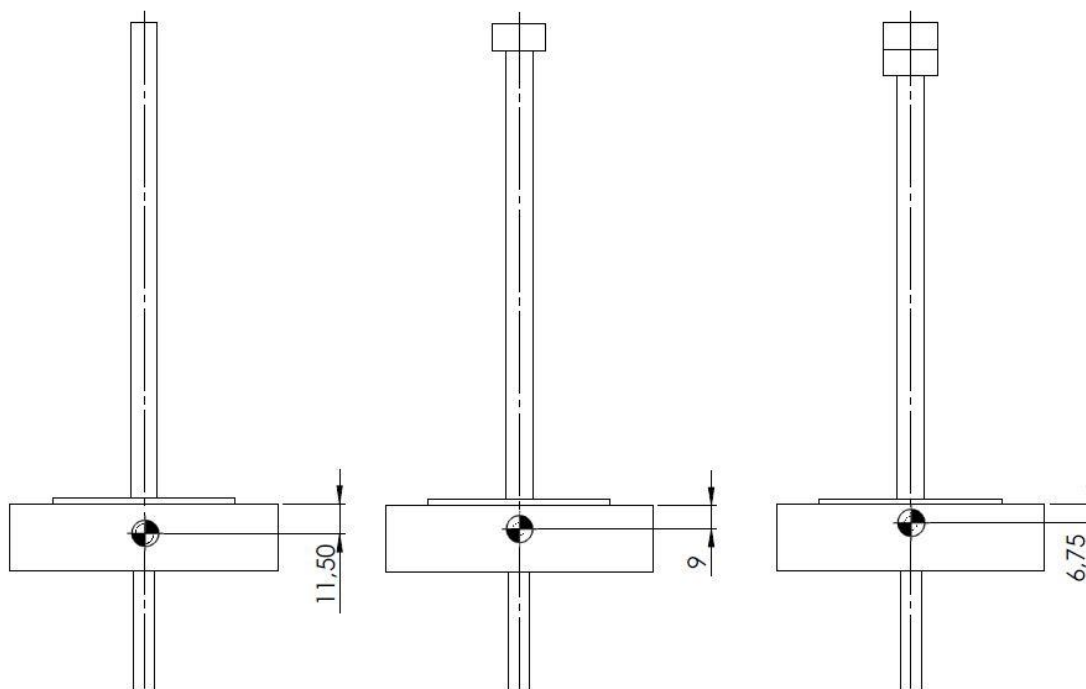
W badaniach modelowych, jako materiał na słup oświetleniowy wybrano aluminium. Było to spowodowane tym, że materiał kompozytowy dostarczony przez producenta był w formie arkusza i niemożliwe było uzyskanie założonej geometrii. Dlatego też wybrano materiał, jaki najczęściej jest stosowany do wytwarzania słupów oświetleniowych.

Energia uderzenia została określona na podstawie znajomości masy wahadła oraz prędkości uderzenia określonej na podstawie przeprowadzonej analizy nagranych materiału filmowego. Jej średnie wartości wynosiły odpowiednio:

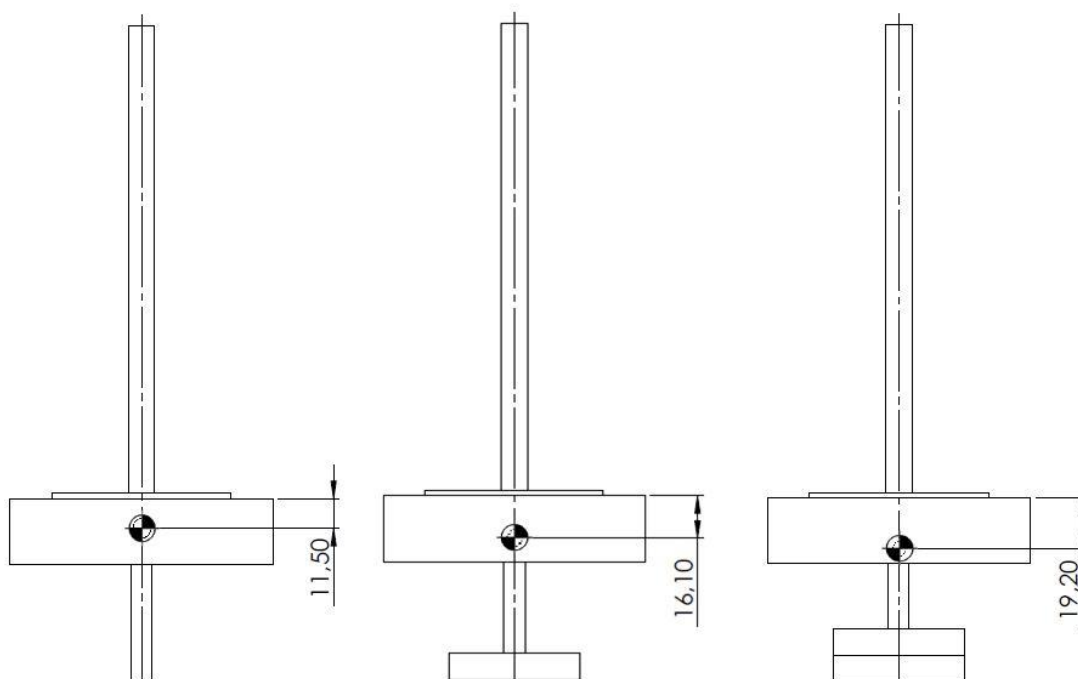
- $E1 = 9,15J$
- $E2 = 11J$
- $E3 = 13J$

Przeanalizowano trzy sposoby dodatkowego obciążenia elementu umożliwiające zmianę położenia środka ciężkości. Pierwszy sposób polegał na dodaniu masy w górnej części słupa oświetleniowego, dzięki temu środek ciężkości badanego elementu został

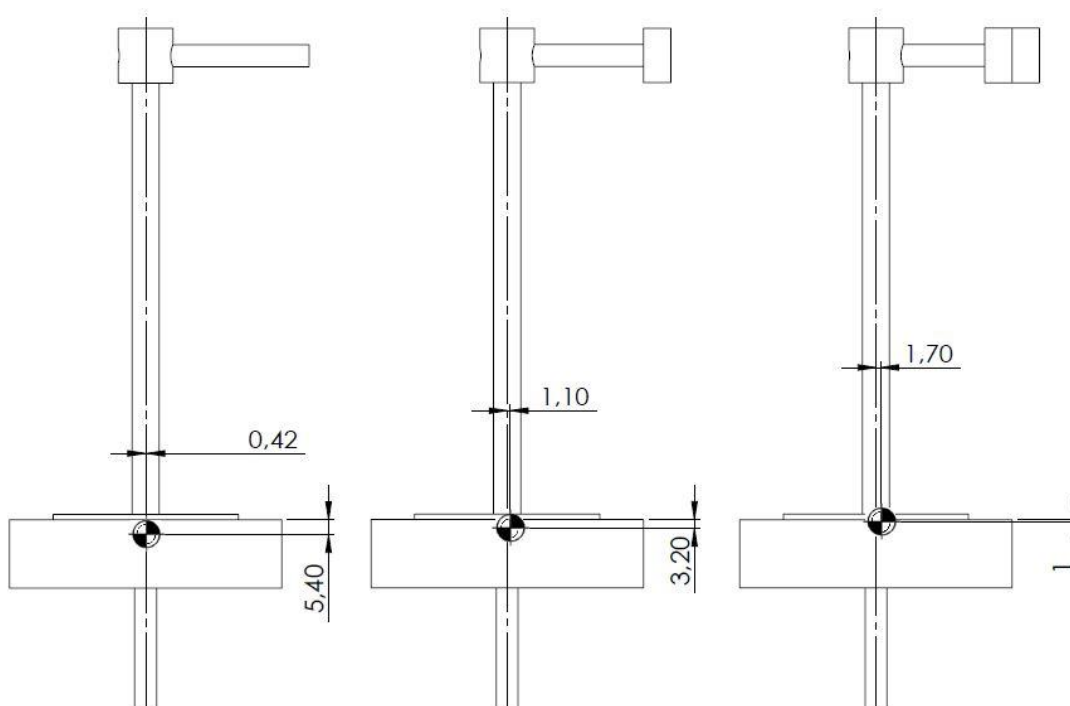
podniesiony, natomiast w dalszym ciągu znajdował się w osi elementu. Drugi sposób dotyczył dodania masy we fragmencie słupa znajdującym się pod ziemią, powodowało to obniżenie położenia środka ciężkości, który znajdował się w osi słupa. Trzeci sposób polegał na dodaniu masy na wysięgniku lampy, wskutek czego uzyskano podniesienie położenia środka masy i jednocześnie przesunięcie go od osi w kierunku wysięgnika. Ilustracje obrazujące położenie środka masy w każdym z tych przypadków przedstawiono na rys. 69 - 71.



Rys. 69. Położenie środka ciężkości w przypadku dodania masy w górnym położeniu



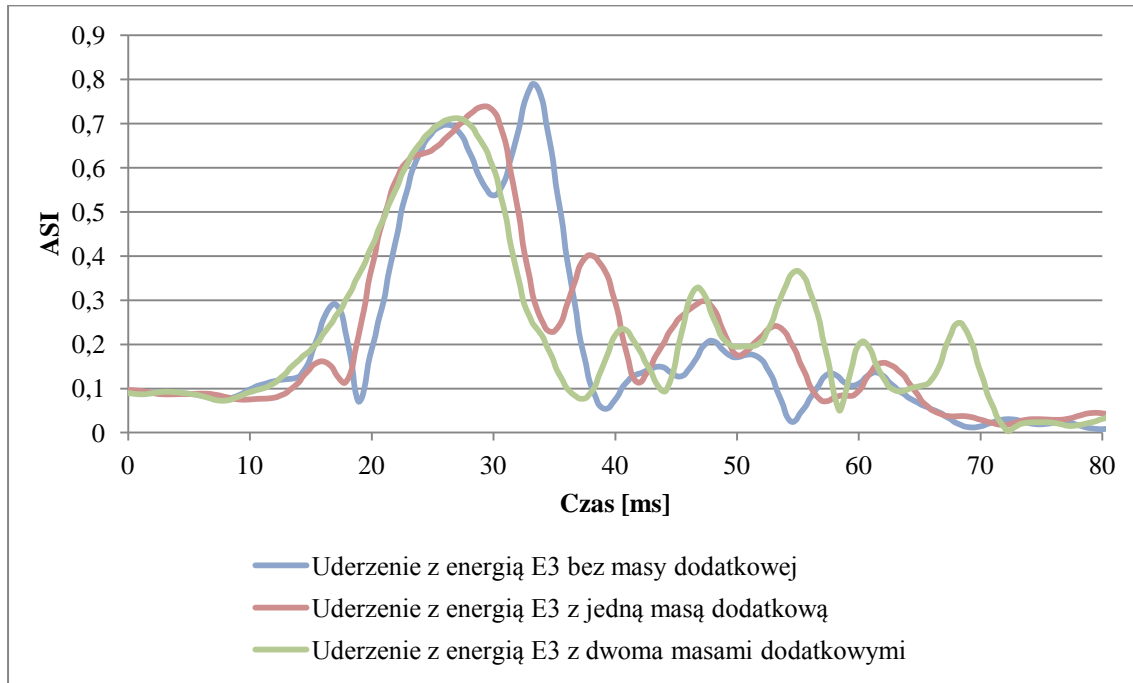
Rys. 70. Położenie środka ciężkości w przypadku dodania masy w dolnym położeniu



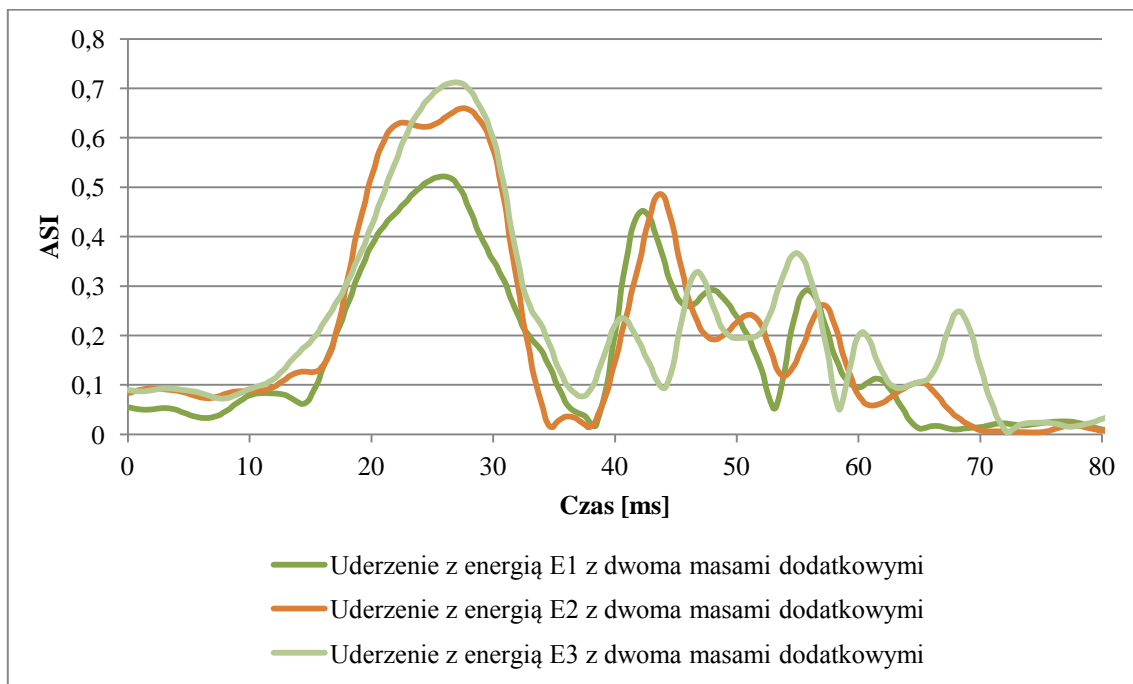
Rys. 71. Położenie środka ciężkości w przypadku dodania masy na wysięgniku

Przeprowadzono badania dotyczące każdego ze sposobów dodatkowego obciążenia konstrukcji przy trzech różnych energiach uderzenia, mających symulować

uderzenie pojazdów o różnych masach. Wartość współczynnika ASI oraz zachowanie słupa w trakcie zderzenia w przypadku podniesienia położenia środka masy przedstawiono na rysunkach 72 i 73.



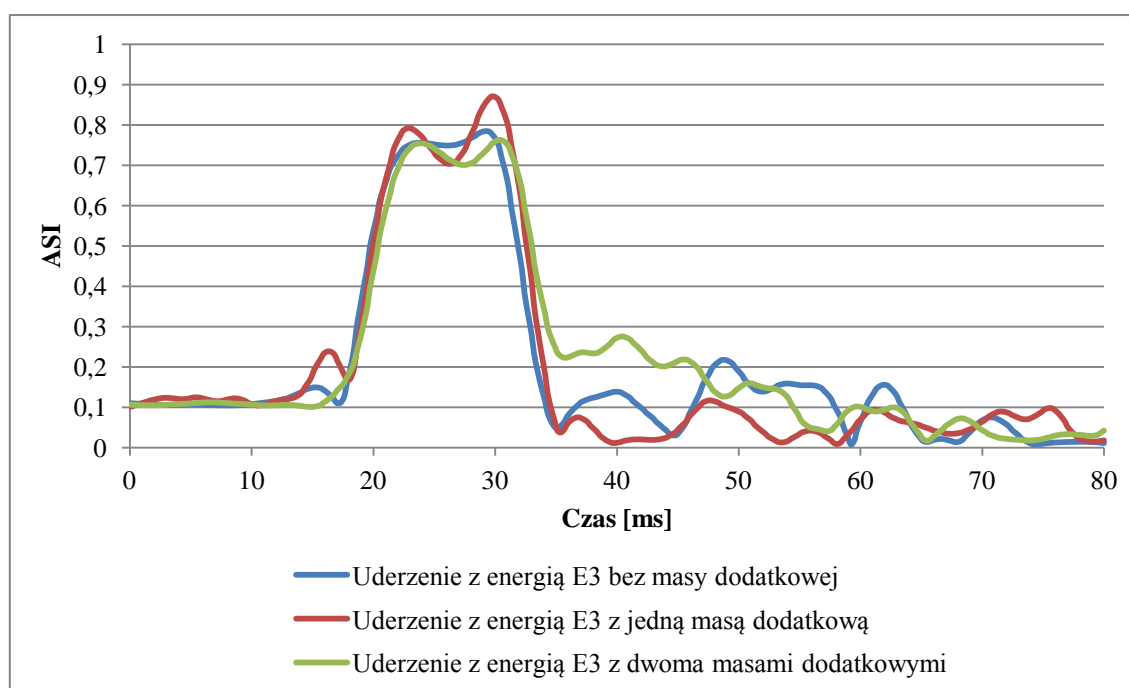
Rys. 72. Wpływ podniesienia położenia środka ciężkości w osi słupa na wartość współczynnika ASI



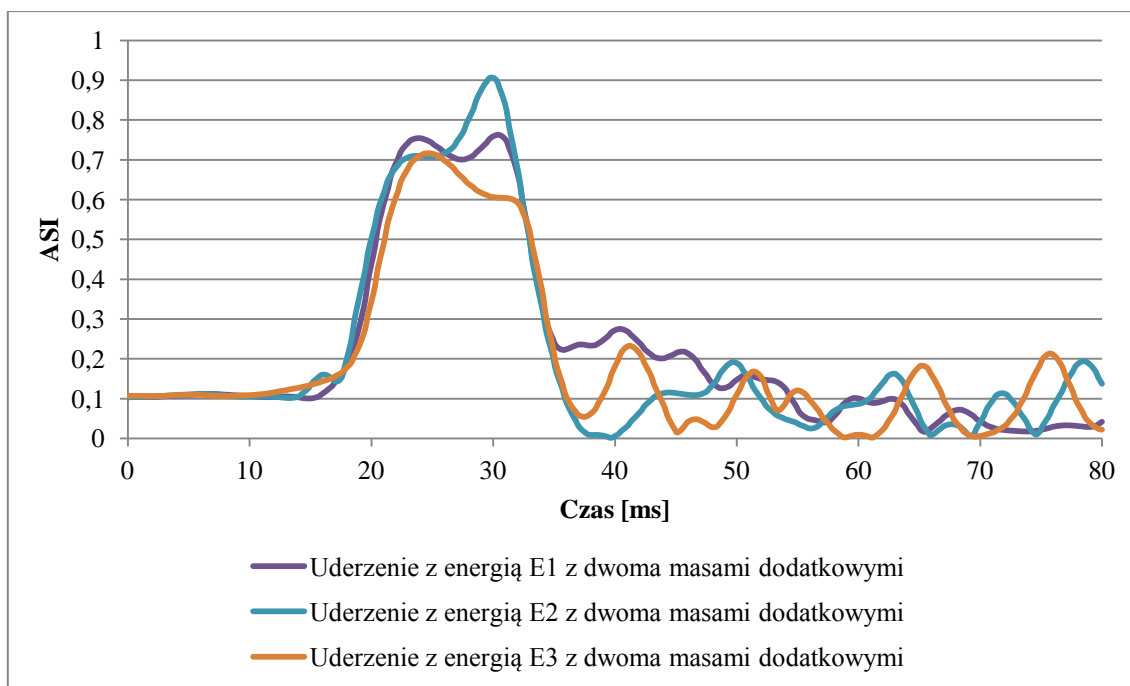
Rys. 73. Wpływ energii uderzenia dla przypadku podniesienia położenia środka ciężkości w osi słupa na wartość współczynnika ASI

Na podstawie danych przedstawionych na wykresie (rys. 72) można zaobserwować, że podniesienie położenia środka ciężkości wpływa na obniżenie wartości współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI. Podniesienie położenia środka masy o 2,5mm powoduje obniżenie wartości współczynnika o około 9%, natomiast w przypadku podniesienia położenia środka ciężkości o 4,75mm wartość współczynnika ASI obniża się o około 13% względem wartości początkowej. Analizując dane przedstawione na wykresie (rys. 73), gdzie położenie środka ciężkości zostało podniesione o 4,75mm, zaobserwowano, że wzrost energii uderzenia powoduje wzrost wartości współczynnika ASI. Zmiana wartości tego współczynnika jest znaczna i różnica pomiędzy uderzeniem z energią E1 a energią E3 wynosi ponad 30%.

Wartości współczynnika ASI oraz zachowanie słupa podczas zderzenia w przypadku obniżenia położenia środka przedstawiono na rysunkach 74 i 75.



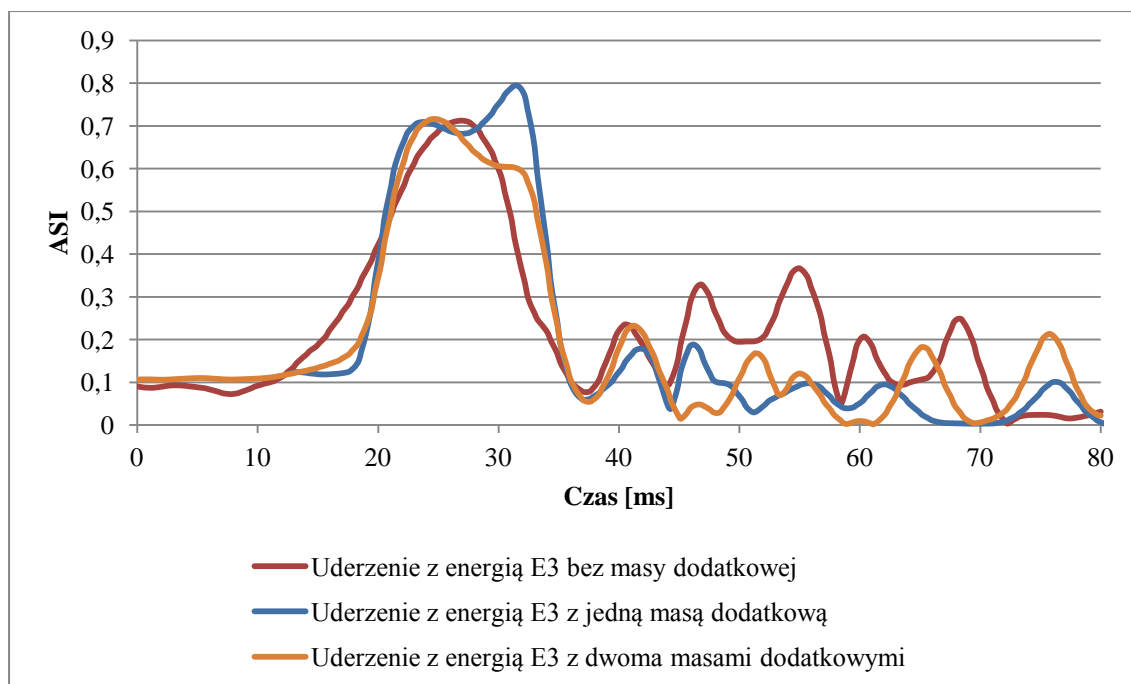
Rys. 74. Wpływ obniżenia położenia środka ciężkości w osi słupa na wartość współczynnika ASI



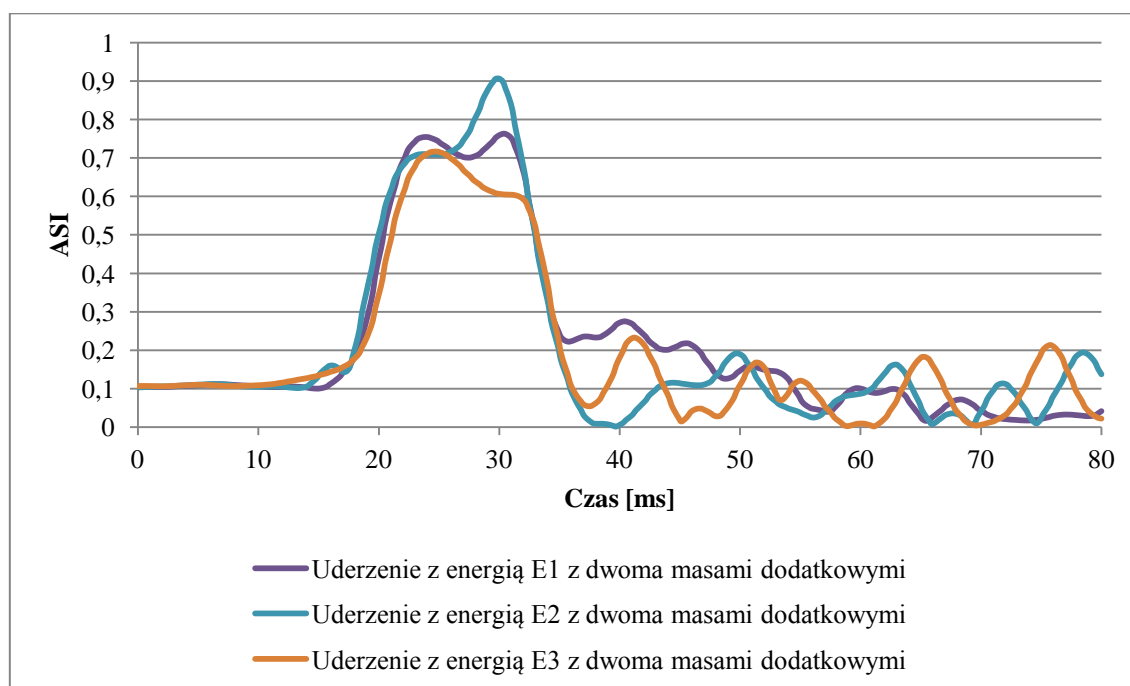
Rys. 75. Wpływ energii uderzenia dla przypadku obniżenia położenia środka ciężkości w osi słupa na wartość współczynnika ASI

Na podstawie danych przedstawionych na rys. 74, można zaobserwować, że obniżenie położenia środka ciężkości o 4,6mm powoduje wzrost wartości współczynnika bezpieczeństwa biernego o około 14%, natomiast przy obniżeniu położenia środka ciężkości o 7,7mm wartość tego współczynnika maleje o około 1% względem wariantu bez masy dodatkowej. Analizując dane przedstawione na rys. 75, gdzie położenie środka ciężkości zostało obniżone o 7,7mm, zaobserwowano, że wzrost energii uderzenia powyżej pewnej wartości powoduje spadek wartości współczynnika ASI. Przy energii uderzenia E2 wartość współczynnika ASI wzrosła o około 20%, natomiast przy zderzeniu z energią E3 wartość tego współczynnika zmalała o około 5%.

Wartość współczynnika ASI oraz zachowanie słupa w trakcie zderzenia w przypadku przesunięcia położenia środka masy poza jego oś symetrii przedstawiono na rysunkach 76 i 77.



Rys. 76. Wpływ przesunięcia położenia środka ciężkości poza jego oś symetrii na wartość współczynnika ASI

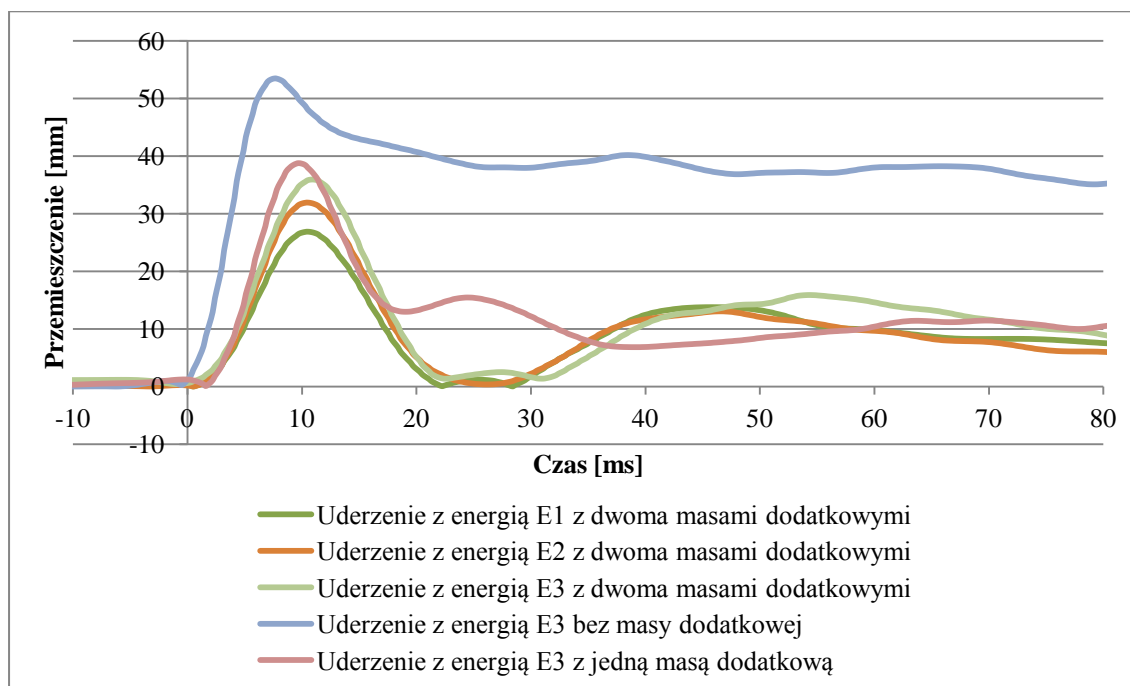


Rys. 77. Wpływ energii uderzenia dla przypadku przesunięcia położenia środka ciężkości poza jego oś symetrii na wartość współczynnika ASI

Na podstawie danych przedstawionych na rys. 76, można zaobserwować, że przesunięcie położenia środka ciężkości od osi symetrii słupa nie wpływa na zmniejszenie wartości współczynnika ASI. Z drugiej strony możliwy jest

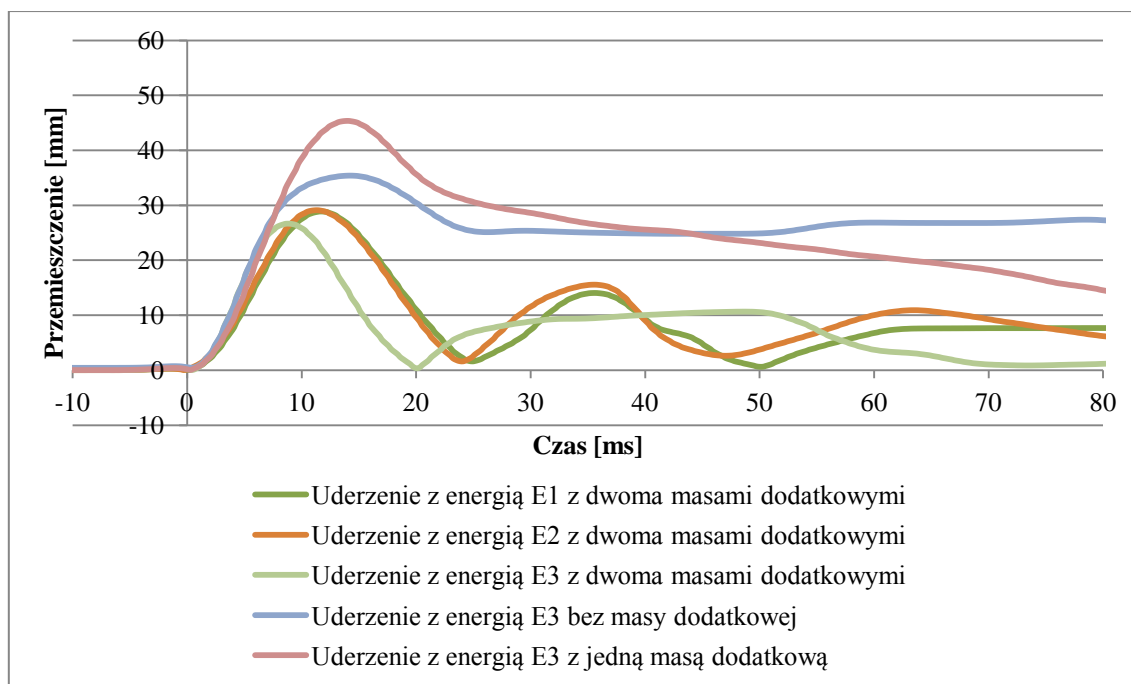
do zaobserwowania wpływ wartości energii uderzenia na wartości tego współczynnika, gdzie przy energii E3 zaobserwowano spadek wartości współczynnika ASI o około 6%.

Zachowanie słupa oświetleniowego w trakcie zderzenia przedstawiono na rys. od 78 do 80.



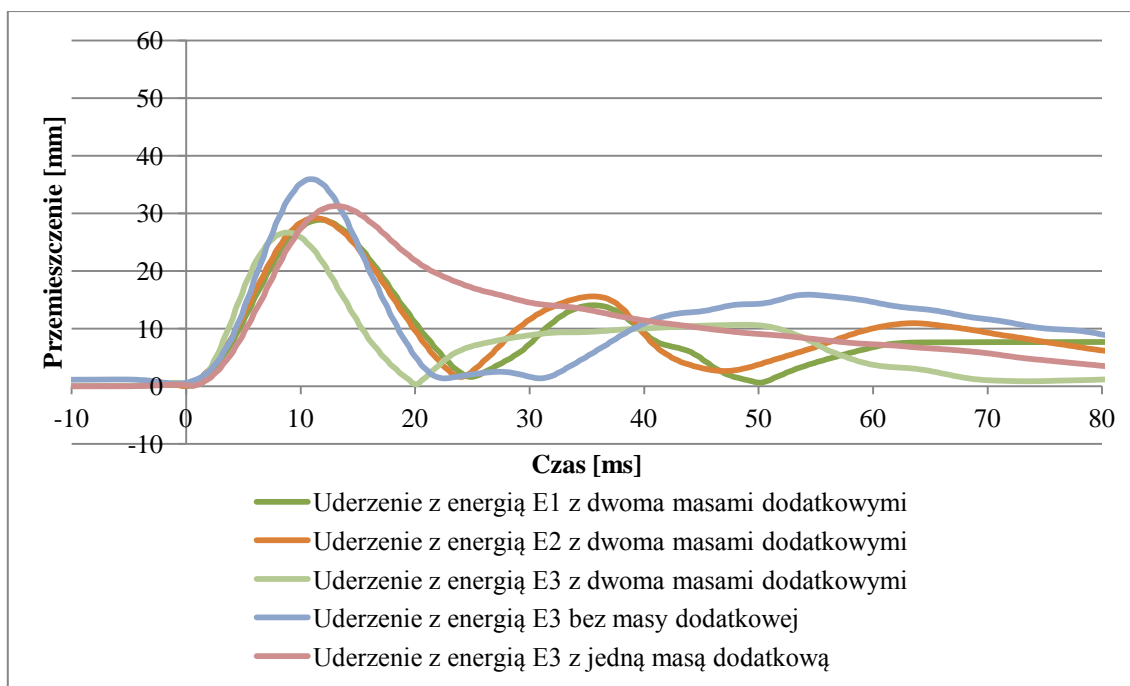
Rys. 78. Przemieszczenie wierzchołka słupa (punkt 4) w trakcie zderzenia dla przypadku podniesienia położenia środka masy

Analizując wykres przedstawiony na rys. 78, można stwierdzić, że podniesienie położenia środka masy, uzyskane poprzez dodanie masy w górnej części słupa, umożliwia zmniejszenie maksymalnego wychylenia słupa oświetleniowego. Jeżeli chodzi o wpływ energii uderzenia na wychylenie słupa, to można zauważyć, że wraz ze zwiększaniem energii uderzenia rośnie maksymalne wychylenie słupa. Ponadto, dla największej energii uderzenia dla przypadku bez masy dodatkowej, po ustaniu wymuszenia, słup tylko nieznacznie wrócił do swojego położenia początkowego, w porównaniu do pozostałych, gdzie położenie słupa po uderzeniu znajdowało się w pobliżu punktu początkowego.



Rys. 79. Przeszczenie wierzchołka słupa (punkt 4) w trakcie zderzenia dla przypadku obniżenia położenia środka masy

Analizując dane przedstawione na rys. 79, można zaobserwować wpływ obniżenia położenia środka masy na przeszczenie wierzchołka słupa. Najwyższa wartość wychylenia słupa oświetleniowego uzyskano przy uderzeniu z energią E3 z jedną masą dodatkową, natomiast najmniejsze wychylenie uzyskano przy uderzeniu z energią E3 z dwoma masami dodatkowymi. Na podstawie tych danych można stwierdzić, że zmniejszenie wychylenia słupa w trakcie zderzenia występuje dopiero po przekroczeniu pewnej masy dodatkowej, powodującej obniżenie położenia środka ciężkości. W przypadkach uderzenia z energią E3 z jedną oraz dwoma masami dodatkowymi słup po zderzeniu nie powrócił w okolice położenia początkowego, jak to miało miejsce w pozostałych przypadkach.

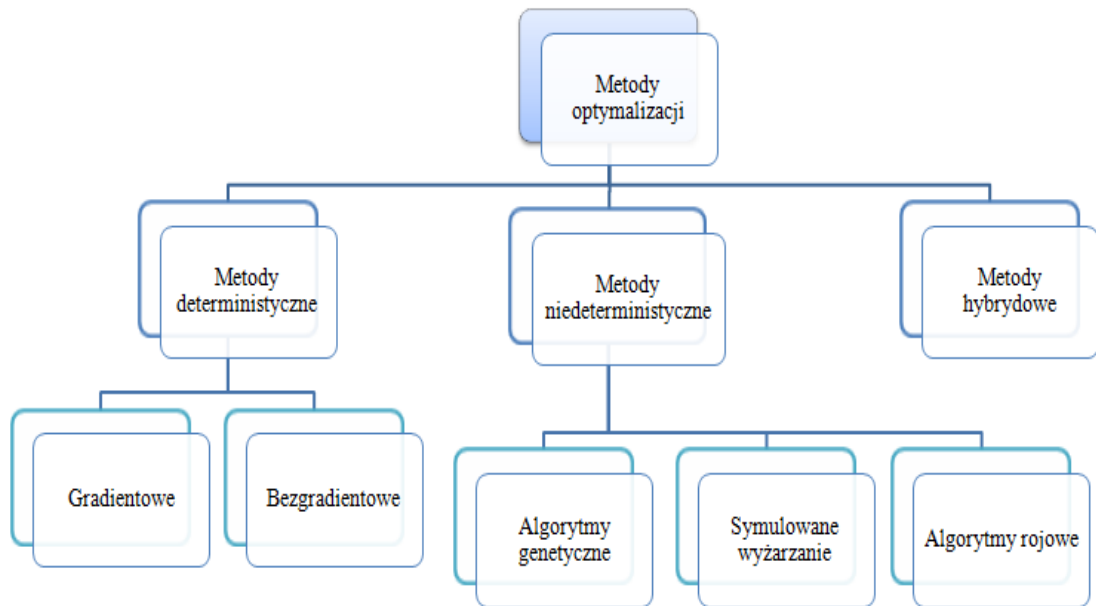


Rys. 80. Przeszczenie wierzchołka słupa (punkt 4) w trakcie zderzenia dla przypadku przesunięcia położenia środka ciężkości poza jego oś symetrii

W przypadku przesunięcia położenia środka ciężkości poza jego oś symetrii można zauważyć, że parametr ten nie wpływa na przeszczenie wierzchołka słupa w trakcie zderzenia w takim stopniu jak w przypadku podniesienia, albo obniżenia położenia środka ciężkości. Najwyższą wartość przeszczenia wierzchołka słupa zaobserwowano przy uderzeniu z energią E3 bez masy dodatkowej, natomiast najniższą przy uderzeniu z energią E3 z dwoma masami dodatkowymi

8.2. Optymalizacja położenia środka masy

Optymalizacją nazywamy dziedzinę nauki, która zajmuje się wyznaczeniem najlepszego rozwiązania ze zbioru wszystkich rozwiązań dopuszczalnych. Wybór optymalnego rozwiązania zależy jest od przyjętych wymagań oraz od kryterium oceny, które może być określone jak funkcja celu lub wskaźnik jakości [37]. Do wyznaczenia wartości optymalnej może służyć wiele różnych metod, jednak najprościej można podzielić je na deterministyczne, nondeterministyczne oraz hybrydowe, które stanowią połączenie obu tych metod. Schemat przedstawiający podział metod optymalizacji został przedstawiono na rys. 81.



Rys. 81. Podział metod optymalizacji [na podstawie [36][37][82]]

Do optymalizacji postaci konstrukcyjnej słupa oświetleniowego zastosowano algorytm genetyczny, który cechuje się prostotą implementacji oraz znacznie wyższym prawdopodobieństwem znalezienia rozwiązania znajdującego się blisko optimum globalnego. Algorytmy genetyczne w swoim działaniu naśladują naturę, a dokładniej, zachodzące w przyrodzie ewolucyjne mechanizmy, takie jak dobór naturalny oraz dziedziczenie [37][82].

Na podstawie wyników uzyskanych z badań doświadczalnych realizowanych na urządzeniu przedstawionym w rozdziale 8.1, podjęto decyzję o przeprowadzeniu optymalizacji postaci konstrukcyjnej słupa oświetleniowego w zależności od trzech zmiennych projektowych. Zmienne te określono jako:

- masa powodująca podniesienie położenia środka ciężkości - M1,
- masa powodująca obniżenie położenia środka ciężkości - M2,
- masa powodująca przesunięcie położenia środka ciężkości od osi symetrii słupa - M3.

Miejsce przyłożenia dodatkowej masy przedstawiono na rys. 81.

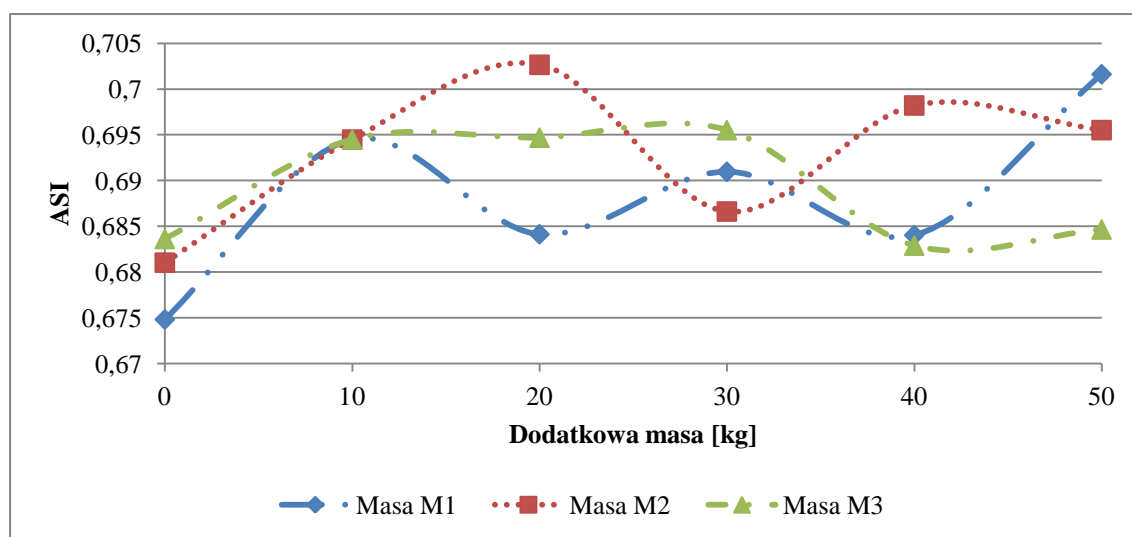


Rys. 82. Miejsca przyłożenia dodatkowej masy

Wartość masy, jaka mogła zostać dodana, ograniczono do 50kg. Miało to na celu wyeliminowanie sytuacji, gdzie optymalna wartość dodanej masy będzie kilku lub kilkunastokrotnie przewyższała masę słupa. Ze względu na szeroki zakres wartości, jakie może przyjmować dodatkowa masa, zdecydowano o ustaleniu populacji początkowej wynoszącej 50 osobników, które były określane losowo ze zbioru rozwiązań dopuszczalnych. Do ustalania kolejnych populacji zastosowano algorytm selekcji oraz operatory genetyczne: krzyżowanie oraz mutację.

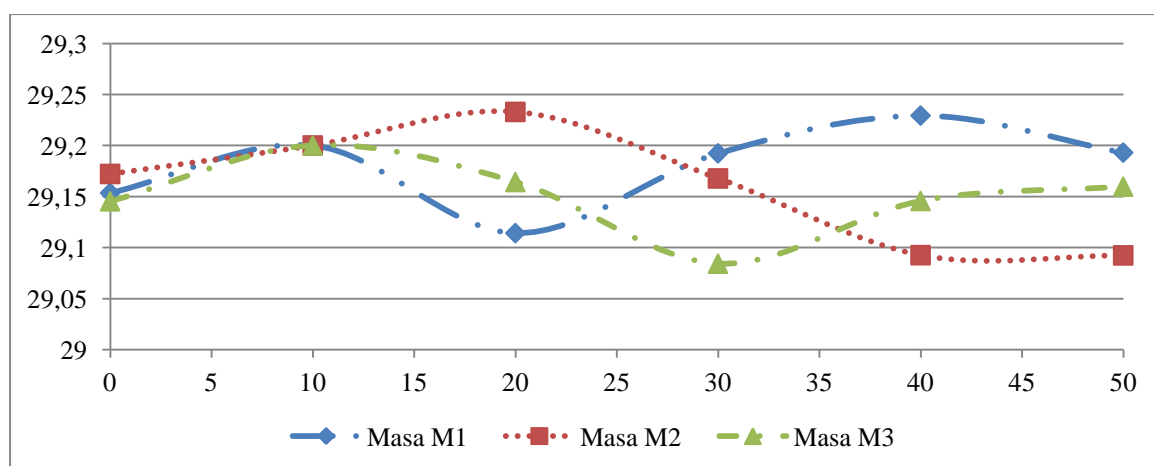
Optymalizacja konstrukcji została przeprowadzona dla dwóch różnych materiałów konstrukcyjnych. Pierwszym było aluminium, natomiast drugim materiał kompozytowy. Optymalizację dotyczącą aluminium przeprowadzono ze względu na fakt, że do badań doświadczalnych zastosowano rurki wykonane z tego materiału.

Wstępną weryfikację przyjętych zmiennych projektowych przeprowadzono poprzez dokonanie analizy wrażliwości zmiany tych parametrów na wartość współczynnika ASI oraz THIV. W tym celu wykonano analizy numeryczne, w których zmieniana była wartość każdej masy z zakresu od 0 do 50kg ze zmianą co 10kg. Wpływ zmiany poszczególnych mas na wartości współczynnika ASI przedstawiono na rys. 83, natomiast dla współczynnika THIV na rys. 84.



Rys. 83. Wpływ masy dodatkowej na wartości współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI

Na podstawie wykresu przedstawionego na rys. 82 można zaobserwować, że każdy z wytypowanych punktów wpływa na wartości współczynnika ASI, dlatego podjęto kolejne kroki mające na celu wybranie najlepszego rozwiązania.



Rys. 84. Wpływ masy dodatkowej na wartości współczynnika bezpieczeństwa biernego THIV

Na podstawie wykresu przedstawionego na rys. 84 można stwierdzić, że zmiana położenia środka ciężkości słupa oświetleniowego nie wpływa w znacznym stopniu (różnica pomiędzy maksymalną i minimalną wartością współczynnika THIV wynosi około 0,5%) na wartość współczynnika bezpieczeństwa biernego THIV

Wg polskich oraz europejskich norm bezpieczeństwo bierne konstrukcji wsporczych określane jest na podstawie wartości współczynników bezpieczeństwa biernego ASI oraz THIV. Na podstawie analizy wrażliwości określono, że zmiana położenia środka masy nie wpływa na wartość współczynnika THIV w funkcji celu znalazł się tylko współczynnik bezpieczeństwa biernego ASI.

$$\min f(\mathbf{x}) = ASI(\mathbf{x}) \quad (31)$$

$$\mathbf{x} = [M1, M2, M3] \quad (32)$$

gdzie:

- masa powodująca podniesienie położenia środka ciężkości - M1,
- masa powodująca obniżenie położenia środka ciężkości - M2,
- masa powodująca przesunięcie położenia środka ciężkości od osi symetrii słupa - M3.

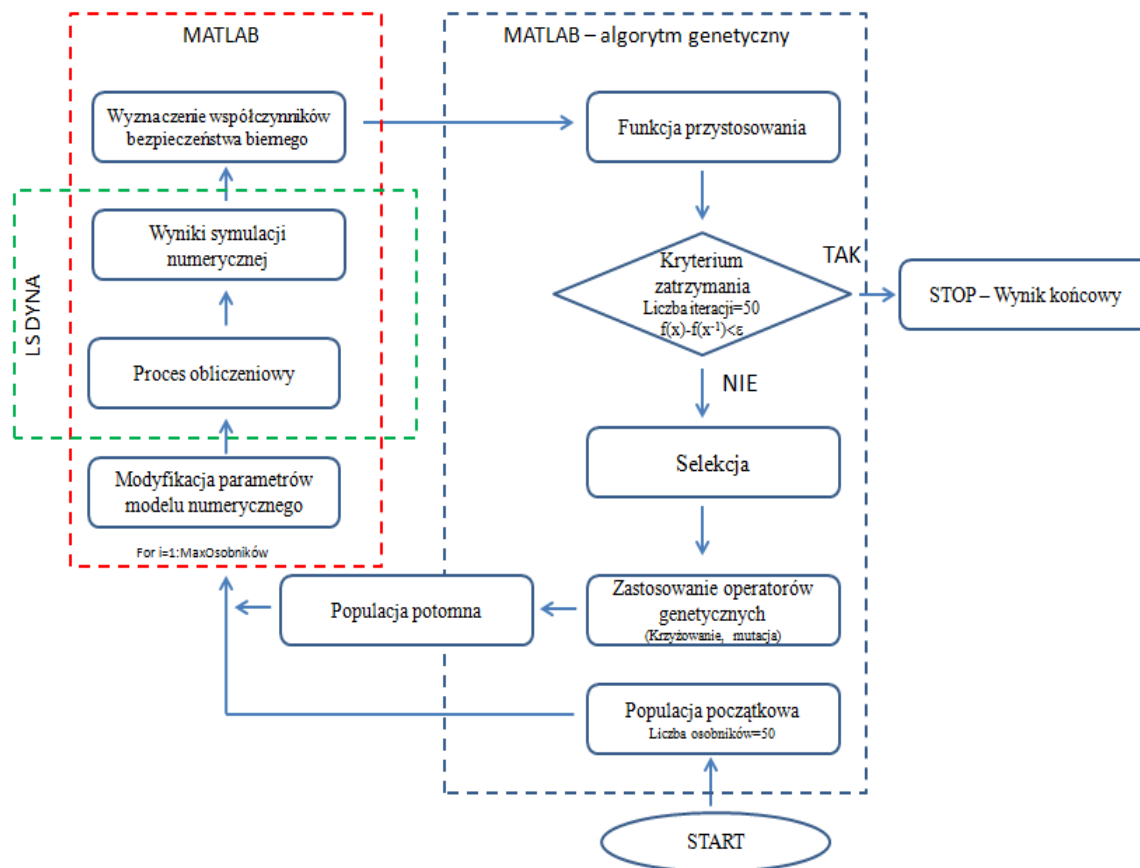
p.o.

$$0 \leq M1 \leq 50 \quad (33)$$

$$0 \leq M2 \leq 50 \quad (34)$$

$$0 \leq M3 \leq 50 \quad (35)$$

Schemat algorytmu genetycznego, który zastosowano w tej pracy przedstawiono na rys. 85.



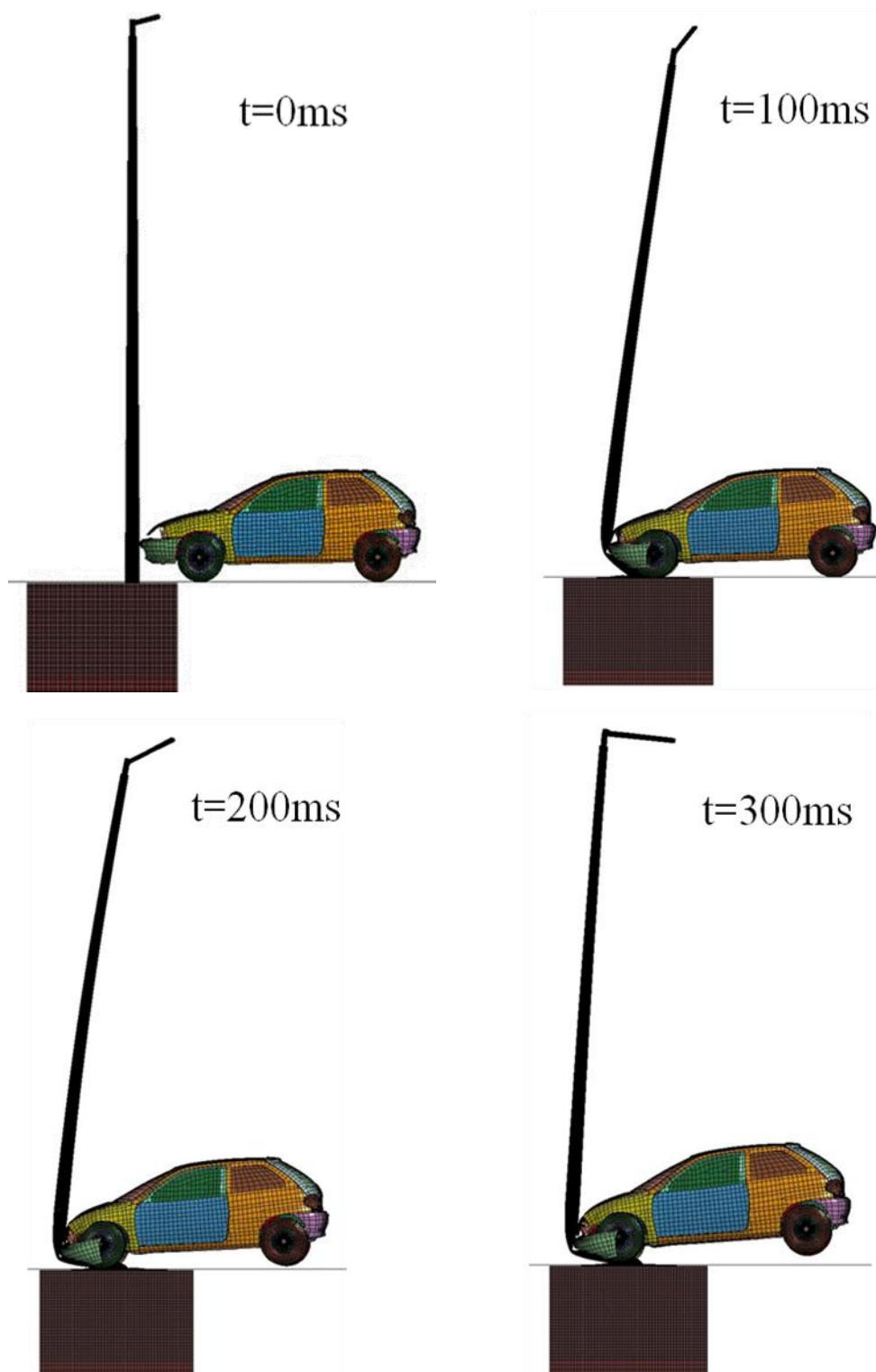
Rys. 85. Schemat blokowy zastosowanego algorytmu genetycznego

Przeprowadzona optymalizacja postaci konstrukcyjnej z zastosowaniem algorytmu genetycznego umożliwiła zredukowanie wartości współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI odpowiednio w słupach wykonanych z aluminium o 1,8%, natomiast w słupach z materiału kompozytowego o 1,1%. Wobec drugiego analizowanego współczynnika bezpieczeństwa biernego THIV zaobserwowano, że parametry, które przyjęto jako zmienne projektowe, nie wpływają na wartość tego współczynnika.

W konstrukcji słupa oświetleniowego wykonanego z aluminium masa, którą należy dodać w celu uzyskania rozwiązania optymalnego, wynosi:

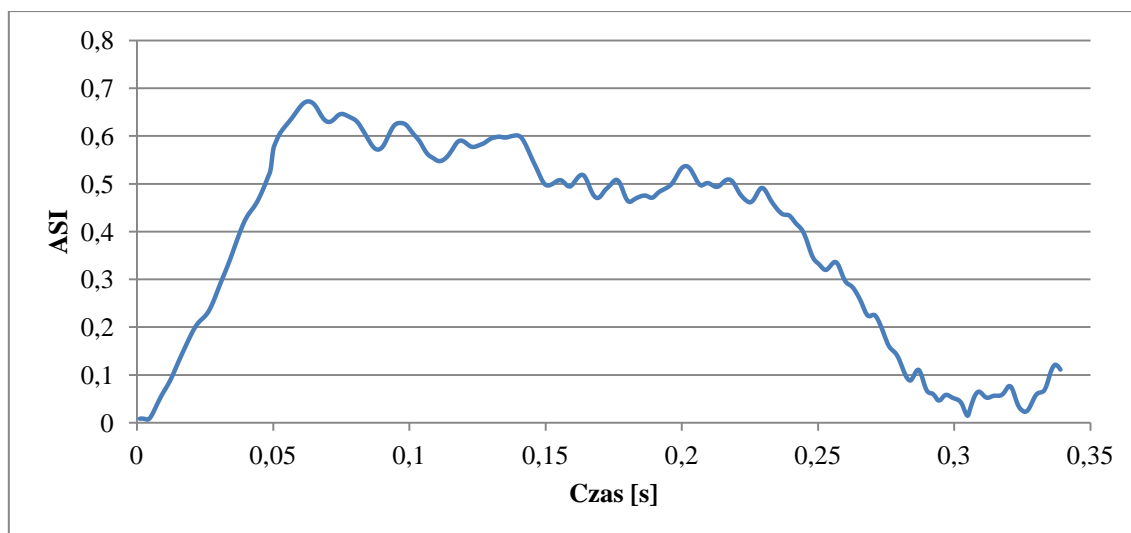
- M1= 0kg,
- M2= 3,08kg,
- M3= 50kg.

Analizę jakościową optymalnej postaci konstrukcyjnej przedstawiono na rys. 86.



Rys. 86. Analiza jakościowa zderzenia pojazdu z optymalną postacią konstrukcyjną aluminiowego słupa oświetleniowego dla $t=0\text{ ms}$, $t=100\text{ ms}$, $t=200\text{ ms}$ oraz $t=300\text{ ms}$

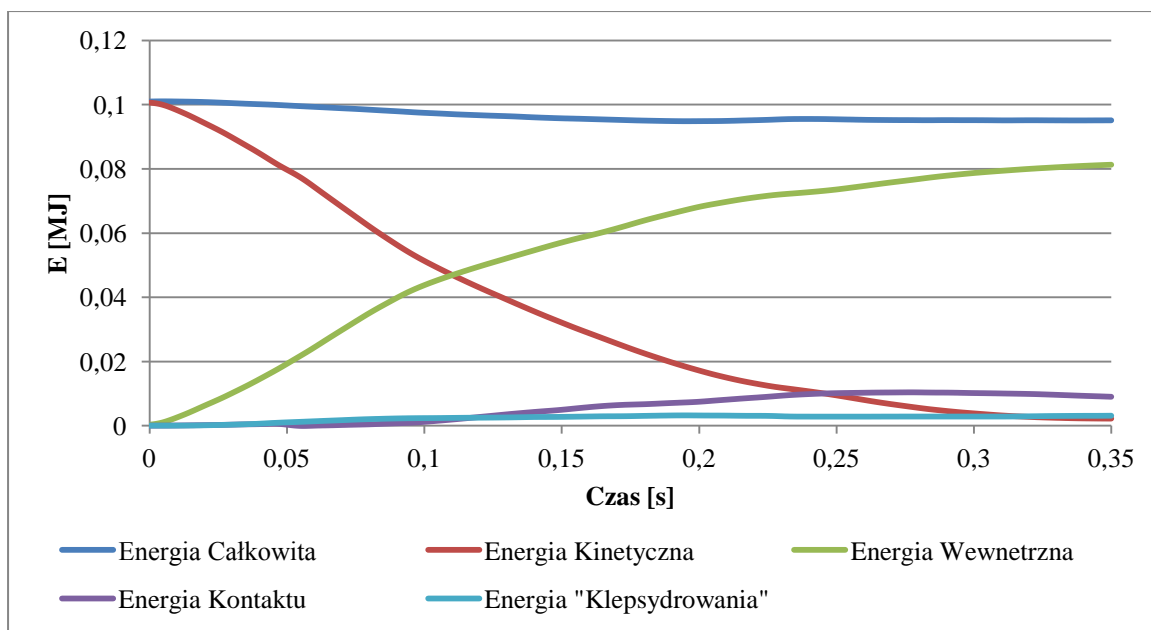
Wartość współczynnika ASI w funkcji czasu przedstawiono na rys. 87.



Rys. 87. Wartość współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI w funkcji czasu uzyskane z symulacji numerycznej dla optymalnej postaci konstrukcyjnej aluminiowego słupa oświetleniowego

Na podstawie danych przedstawionych na rysunkach 86 i 87 można zaobserwować, że maksymalna wartość współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI została zredukowana o 1,8% w stosunku do wartości uzyskanej w trakcie zderzenia ze słupem bez dodatkowej masy. Wartość współczynnika ASI słupa wykonanego z aluminium po uderzeniu w słup osiąga wartość najwyższą, natomiast w późniejszej fazie zderzenia wartość ta stopniowo opada.

Na podstawie bilansu energetycznego, służącego do analizy procesu pochłaniania energii oraz kontroli poprawności symulacji numerycznej przedstawionego na rys. 88 określono, że w trakcie zderzenia pochłonięte zostało 97% energii kinetycznej pojazdu. Dodatkowo określono, że wartość "energii klepsydrowania" w stosunku do maksymalnej wartości energii całkowitej wynosi 3,4%, co jest mniejsze od zalecanych wartości.

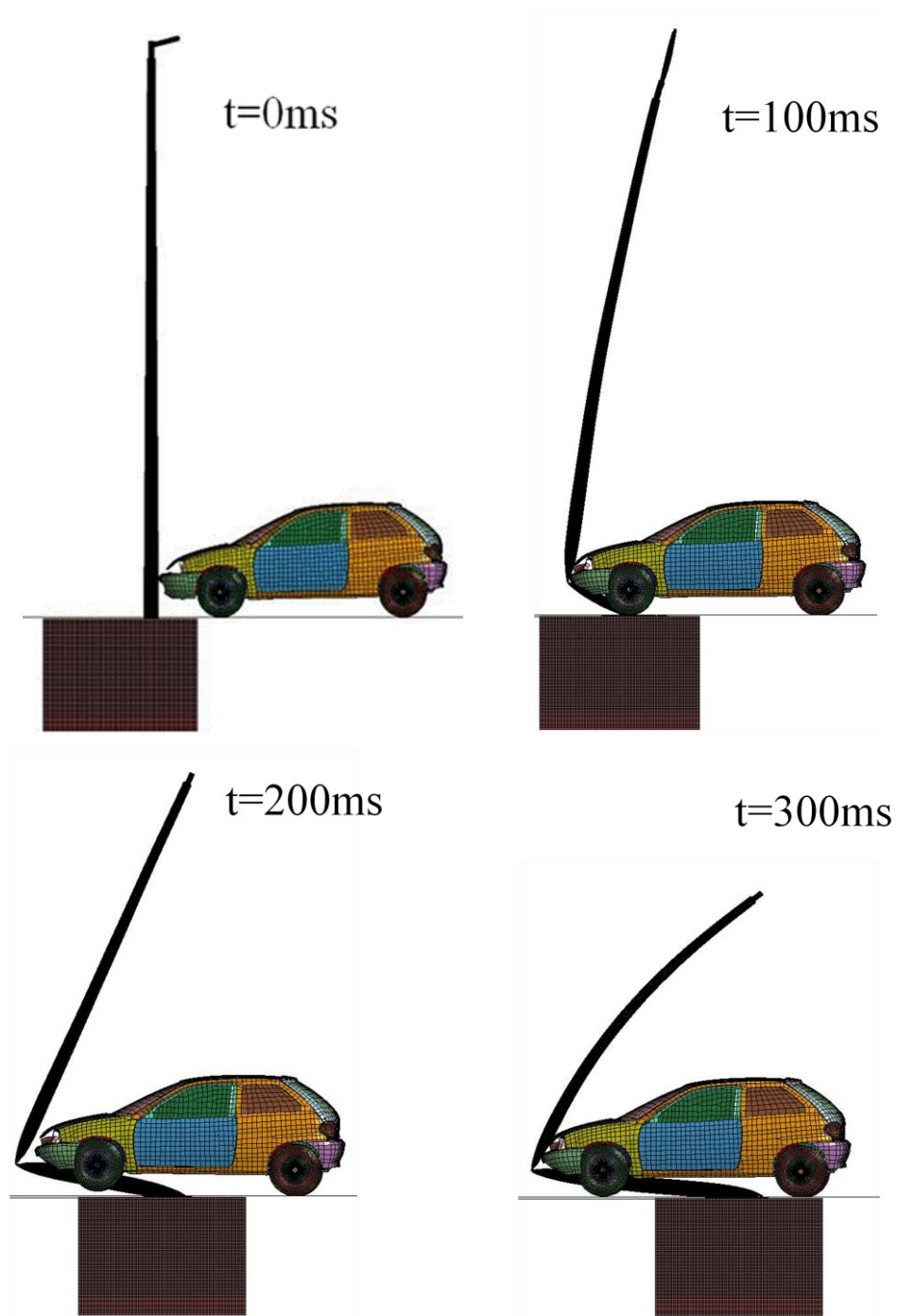


Rys. 88. Bilans energetyczny symulacji numerycznej zderzenia pojazdu dla optymalnej postaci konstrukcyjnej aluminiowego słupa oświetleniowego

W słupie oświetleniowym wykonanym z materiału kompozytowego masa, którą należy dodać w celu uzyskania rozwiązania optymalnego wynosi:

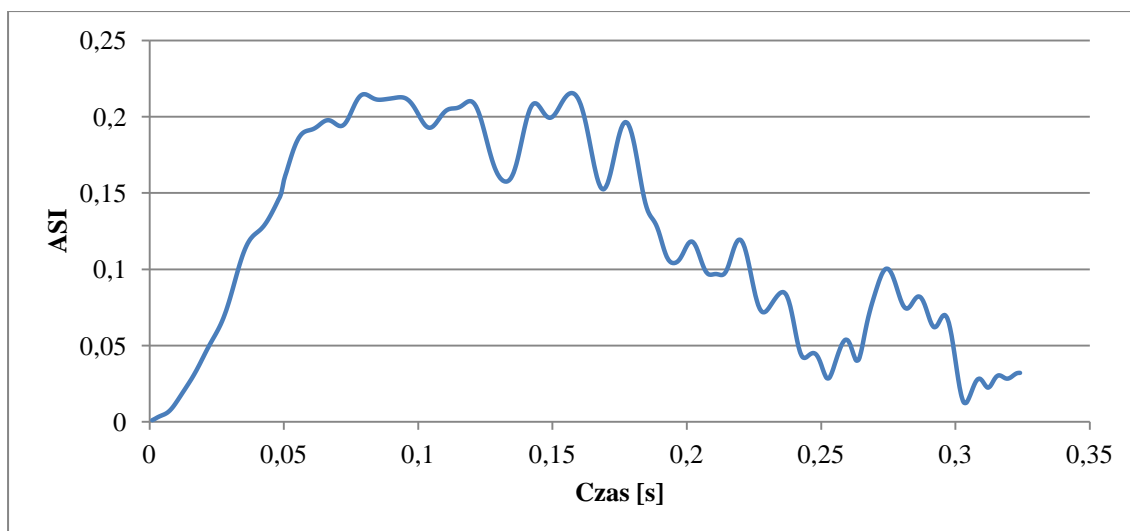
- $M1 = 31\text{kg}$,
- $M2 = 0\text{kg}$,
- $M3 = 50\text{kg}$.

Analizę jakościową optymalnej postaci konstrukcyjnej przedstawiono na rys. 89.



Rys. 89. Analiza jakościowa zderzenia pojazdu z optymalną postacią konstrukcyjną kompozytowego słupa oświetleniowego dla $t=0\text{ ms}$, $t=100\text{ ms}$, $t=200\text{ ms}$ oraz $t=300\text{ ms}$

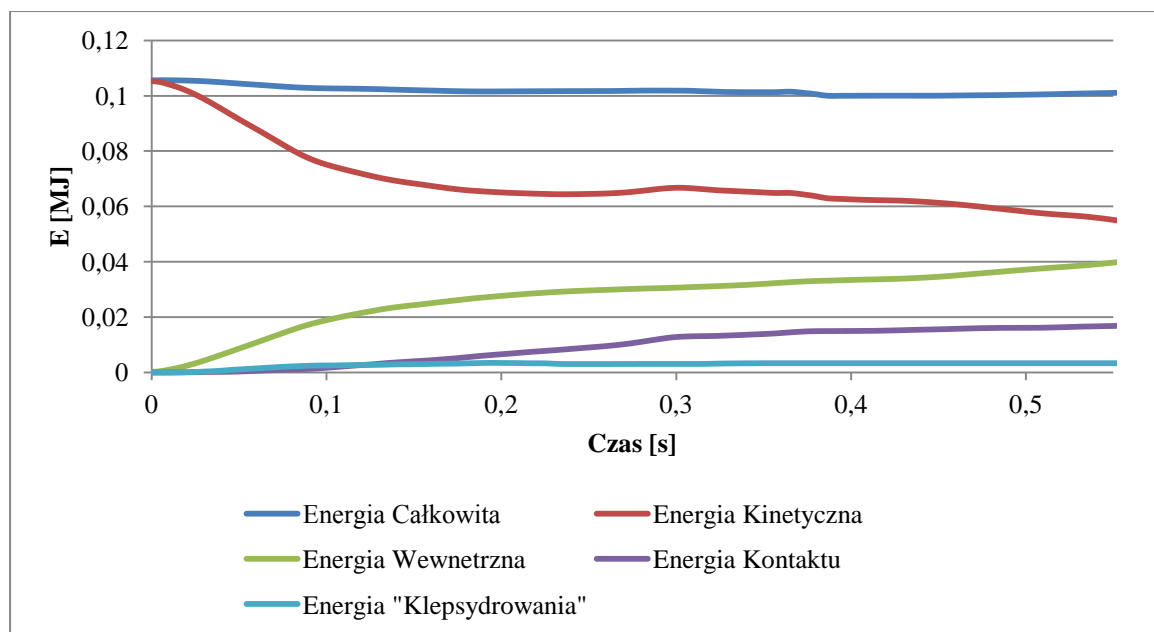
Wartość współczynnika ASI w funkcji czasu przedstawiono na rys. 90.



Rys. 90. Wartość współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI w funkcji czasu uzyskane z symulacji numerycznej dla optymalnej postaci konstrukcyjnej kompozytowego słupa oświetleniowego

Analizując dane przedstawione na rysunkach 89 oraz 90 można zauważyć, że maksymalna wartość współczynnika bezpieczeństwa biernego ASI została zredukowana o 1,1% natomiast wartość ta utrzymuje się przez znacznie dłuższy okres, niż ma to miejsce w przypadku zderzenia z słupem bez dodatkowego obciążenia. Utrzymywanie się wartości współczynnika ASI przez dłuższy czas na poziomie wartości maksymalnej może mieć niekorzystny wpływ na osoby znajdujące się w pojeździe, ponieważ dłużej będą narażone na działanie czynników niekorzystnie oddziałujących na ich zdrowie.

Na podstawie bilansu energetycznego, służącego do analizy procesu pochłaniania energii oraz kontroli poprawności symulacji numerycznej przedstawionego na rys. 91 określono, że w trakcie zderzenia pochłonięte zostało 49% energii kinetycznej pojazdu. Dodatkowo określono, że wartość "energii klepsydrowania" w stosunku do maksymalnej wartości energii całkowitej wynosi 3,4%, co jest mniejsze od zalecanych wartości.



Rys. 91. Bilans energetyczny symulacji numerycznej zderzenia pojazdu dla optymalnej postaci konstrukcyjnej kompozytowego słupa oświetleniowego

Zastosowanie algorytmów genetycznych umożliwiło określenie optymalnej postaci konstrukcyjnej słupów oświetleniowych wykonanych zarówno z materiału kompozytowego, jak i aluminium, czym potwierdzona została zależność uzyskana na podstawie badań doświadczalnych na stanowisku badawczym. Uzyskane wartości dla słupa oświetleniowego o rzeczywistych wymiarach, zmieniają się zaledwie o 1-2%, gdzie dla stanowiska badawczego uzyskiwana była zmiana wartości współczynnika ASI, o ponad 10% w stosunku do początkowej postaci. Uzyskane wartości współczynnika ASI oraz fakt, że utrzymują się one na wysokim poziomie przez dłuższy okres niż dla konstrukcji bez masy dodatkowej powodują, że przedstawiony w tym rozdziale sposób wpływania na wartość współczynnika ASI nie ma uzasadnienia z technologicznego punktu widzenia.

9. Podsumowanie i wnioski

Niniejsza rozprawa doktorska dotyczyła określenia wpływu grubości ścianki oraz położenia środka ciężkości słupa oświetleniowego na wartość współczynników bezpieczeństwa biernego w trakcie zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym. W pierwszym etapie pracy wykonano model numeryczny zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym i zweryfikowano poprawność jego działania na podstawie wyników uzyskanych z badań doświadczalnych. Opracowany model stanowił podstawę do kolejnych etapów, które miały na celu redukcję wartości współczynników bezpieczeństwa biernego.

W pracy przedstawiono wpływ dwóch parametrów (grubość ścianki słupa, położenia środka ciężkości) na obniżenie wartości współczynników bezpieczeństwa biernego. W pierwszej kolejności sprawdzono wpływ grubości ścianki słupa oświetleniowego na wartość współczynników ASI oraz THIV. Minimalna grubość ścianki słupa została określona na podstawie analizy stereomechanicznej, gdzie konstrukcja słupa była poddawana obciążeniom wynikającym z masy własnej słupa oraz naporu wiatru wyznaczanego zgodnie z PN-EN 40. Do wyznaczenia wartości współczynników ASI oraz THIV w całym badanym przedziale zmienności grubości ścianki zastosowano opracowany algorytm przygotowany w oprogramowaniu MATLAB. Opracowany plik .m umożliwiał modyfikację pliku wsadowego (pliku .k) oraz uruchamianie procesu obliczeniowego w pętli ze zmianą grubości ścianki słupa o 0,1mm. W celu określenia najlepszego rozwiązania ze zbioru otrzymanych rozwiązań określona została funkcja zawierająca w sobie wartości współczynników bezpieczeństwa biernego, które zostały znormalizowane do wartości 0,5 (zgodnie z literaturą [82]). Na podstawie analizy otrzymanych wyników stwierdzono, że najlepszym rozwiązaniem jest zmniejszenie grubości ścianki słupa do wartości minimalnej równej 3,4mm. Takie działanie powoduje zmniejszenie wartości współczynnika ASI o około 25%, przy równoczesnym zwiększeniu współczynnika THIV o 2%. Zaobserwowano również, że wraz ze wzrostem grubości ścianki słupa wartość współczynnika ASI rośnie, natomiast współczynnika THIV maleje.

Drugi z przedstawionych parametrów służących do redukcji współczynników bezpieczeństwa biernego ASI oraz THIV dotyczył określenia wpływu położenia środka ciężkości słupa oświetleniowego na te współczynniki. W pierwszym etapie

przeprowadzono badania na urządzeniu badawczym, które powstało w ramach pracy magisterskiej w Instytucie Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej. Plan badań obejmował:

- obniżenie położenia środka masy słupa poprzez dodanie masy w dolnej części konstrukcji,
- podwyższenie położenie środka masy słupa poprzez dodanie masy w górnej części konstrukcji,
- przesunięcie położenie środka masy od osi symetrii słupa poprzez dodanie masy na wysięgniku.

Na podstawie zrealizowanych badań doświadczalnych na stanowisku badawczym stwierdzono, że zmiana położenia środka masy słupa oświetleniowego wpływa na obniżenie wartości współczynnika ASI o ponad 10%. Następnie sprawdzono, jak zmiana tego parametru wpływa na wartości współczynników bezpieczeństwa biernego dla słupa oświetleniowego o rzeczywistych wymiarach. W tym celu przeprowadzono optymalizację z zastosowaniem algorytmu genetycznego. Uzyskane wyniki znacznie różniły się od wyników na stanowisku badawczym. W przypadku słupa aluminiowego redukcja wartości współczynnika ASI wynosiła 1,8%, a dla słupa wykonanego z materiału kompozytowego 1,1%. Na różnicę pomiędzy wynikami z analizy numerycznej i doświadczalnej mogły mieć wpływ zbyt duże uproszczenia przyjęte podczas budowy stanowiska badawczego. Dla współczynnika THIV zaobserwowano, że nie zmienia on swojej wartości w zależności od położenia środka masy. Pomimo uzyskania wyników, które umożliwiają redukcję wartości współczynników bezpieczeństwa biernego, takie działania są nieopłacalne pod względem technologicznym, ponieważ będą zwiększały koszty transportu i późniejszego montażu w stopniu nieporównywalnie większym niż korzyści wynikające ze wdrożenia przedstawionego rozwiązania.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury oraz badań własnych można sformułować następujące wnioski:

- Autorzy publikacji naukowych, zarówno polskich jak i międzynarodowych, nie uwzględniają w swoich pracach wpływu grubości ścianki słupa oraz położenia środka ciężkości na wartości współczynników bezpieczeństwa biernego. Autorzy cytowanych prac stosują szereg założeń upraszczających, natomiast nie pokazują

ich wpływu na uzyskane wyniki. Przedstawiona przez nich metodologia prowadzenia badań symulacyjnych jest skrócona, przez co niemożliwe jest jej odtworzenie.

- Zaproponowany algorytm umożliwiający wyznaczenie wartości współczynników bezpieczeństwa biernego ASI i THIV oraz modyfikację pliku wsadowego do oprogramowania LS Dyna, utworzony w oprogramowaniu MATLAB, ma charakter uniwersalny oraz innowacyjny i może być podstawą kolejnych prac związanych ze zderzeniami pojazdów z pozostałymi elementami infrastruktury drogowej.
- Słupy oświetleniowe wykonane z materiału kompozytowego charakteryzują się znacznie niższym współczynnikiem bezpieczeństwa biernego ASI w odniesieniu do słupów wykonanych z aluminium. Współczynnik bezpieczeństwa biernego ASI dla słupów wykonanych z materiału kompozytowego wynosi 0,22, gdzie dla słupów aluminiowych 0,68. W przypadku współczynnika THIV można zaobserwować, że ta zależność jest odwrotna i słupy wykonane z materiału kompozytowego charakteryzują się wyższą wartością tego współczynnika. Wartość współczynnika THIV dla słupa wykonanego z materiału kompozytowego wynosi 39,6km/h natomiast dla słupa aluminiowego 29,2km/h.
- Na podstawie analizy stopnia zagęszczenia gruntu określono, że im grunt bardziej zagęszczony tym wartość współczynnika ASI jest niższa. Dodatkowo dla słupa osadzonego w gruncie luźnym oraz średnio-zagęszczonym zaobserwowano dwa piki, w których wzrasta wartość współczynnika ASI co jest spowodowane tym, że w pierwszej fazie dolna część słupa przemieszcza się wewnątrz gruntu, a dopiero w późniejszej fazie następuje odkształcenie samego słupa.
- Przeprowadzona analiza bilansu energetycznego pozwala stwierdzić, że słupy wykonane z materiału kompozytowego charakteryzują się mniejszą energochłonnością niż słupy wykonane z aluminium.
- Na podstawie analizy stereomechanicznej słupa oświetleniowego wykonanego z materiału kompozytowego obciążonego zgodnie z [68][69][70] określono, że minimalna wartość grubości ścianki słupa oświetleniowego spełniająca wymogi wynosi 3,4mm. Minimalna grubość ścianki słupa jest o 15% mniejsza niż jest aktualnie stosowana w słupach komercyjnych. Redukcja grubości ścianki może

przynieść znaczne obniżenia kosztów wytworzenia słupa oraz jego transportu i montażu.

- Przeprowadzone symulacje numeryczne dla różnych grubości ścianki słupa oświetleniowego, pozwalają stwierdzić że im mniejsza grubość ścianki słupa tym mniejsza wartość współczynnika ASI, natomiast wartość THIV jest wyższa.
- Na podstawie badań modelowych na stanowisku badawczym określono, że podniesienie położenia środka masy może wpłynąć na obniżenie wartości współczynnika ASI o 13%, w przypadku obniżenia położenia środka masy zaobserwowano obniżenie wartości współczynnika ASI o 1%.
- Zastosowanie algorytmów genetycznych do optymalizacji umożliwiło określenie najlepszego pod względem przyjętych kryteriów położenia środka ciężkości słupa oświetleniowego. Uzyskane wyniki odbiegają od wyników uzyskanych na stanowisku badawczym i są około 5-krotnie niższe. Stanowisko badawcze zbyt mocno upraszcza obserwowane zjawisko.

Można wyróżnić następujące elementy mające charakter nowatorski:

- Określenie wpływu grubości ścianki słupa oświetleniowego na wartość współczynników bezpieczeństwa biernego ASI oraz THIV.
- Opracowanie algorytmu umożliwiającego wyznaczanie współczynników bezpieczeństwa biernego ASI oraz THIV na podstawie wyników uzyskanych z symulacji numerycznej oraz modyfikację pliku wsadowego do oprogramowania LS Dyna.
- Wykonanie badań modelowych na stanowisku badawczym mającym symulować zachowanie słupa oświetleniowego w trakcie zderzenia z pojazdem.
- Zastosowanie metod optymalizacji do wyznaczenia najlepszego pod kątem przyjętych kryteriów położenia środka ciężkości słupa oświetleniowego.

Jako kierunki dalszych prac związanych z redukcją wartości współczynników bezpieczeństwa biernego zaproponowano:

- Opracowanie i wykonanie nowego stanowiska badawczego, które lepiej odzwierciedla warunki podczas zderzenia pojazdu ze słupem. Stanowisko takie mogłoby wpłynąć na redukcję kosztów testowania zderzeń pojazdów z infrastrukturą drogową

- Rezultaty przedstawionych badań wykazują, że dalsze prace mogą wpłynąć na poprawę bezpieczeństwa biernego określanego przez współczynniki ASI oraz THIV. Mogą one być skierowane na modyfikację aktualnie stosowanego materiału kompozytowego lub określenie wpływu zmiennej grubości ścianki słupa.

Bibliografia

- [1] Abdel-Nasser, Y. (2013). Frontal crash simulation of vehicles against lighting. *Alexandria Engineering Journal* , strony 295-299
- [2] Abdel-Nasser, Y., Alrajhi, J., Alardhi, M., Alkhulaifi, K. (2013). Frontal Crash Simulation of Vehicles Against Lighting Columns in Kuwait Using FEM. *International Journal of Traffic and Transportation Engineering* 2(5), strony 101-105
- [3] Arabas, J., Tenniel, J. (2001). Wykłady z algorytmów ewolucyjnych. Warszawa: *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*
- [4] Atahana, A. O., Hiekmannb, J. M., Himpec, J., Marrac, J.(2018). Development of a continuous motorcycle protection barrier system using computer simulation and full-scale crash testing. *Accident Analysis and Prevention* 116 (2018), strony 103–115
- [5] Benyahiaa, H., Tarfaouia, M., El Moumena, A., Ouinasb, D. (2018). Prediction of notched strength for cylindrical composites pipes under tensile loading conditions. *Composites Part B* 150 (2018), strony 104–114
- [6] Belytschko, T., Liu, W., Moran, B. (2001). Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures. New York: *John Willey&Sons, Inc*
- [7] Bere, P., Popescu, A., Hancu, L. (2015). Experimental Research Regarding the Tensile Strength of Some Reinforced Composite Materials. *Applied Mechanics and Materials Vol. 808* 2015, strony 131-136
- [8] Bonin, G., Cantisani, G., Loprencipe, G. (2004). Computational 3d models of vehicle's crash on road safety systems. *Proceedings 8th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions: Loads, Roads and the Information Highway* □
- [9] Borokov, A., Klyavin, O., Michailov, A., Kemppinen, M., Kajatsalo, M. (2006). Finite Element Modeling and Analysis of Crash Safe Composite Lighting Columns, Contact- Impct Problem. *Praca przedstawiona na 9th International LS-DYNA Users Conference*, strony 11-20
- [10] Brożek, G., Uhl, T. (2011). Explicit FEM in analysis of crash elements. *Praca przedstawiona na CMM-2011 – Computer Methods in Mechanics*, Warszawa
- [11] Chowdhury, M.A., Nuruzzaman, D.M., Roy, B.K., Samad, S., Sarker, R., Rezwan, A.H.M. (2013) Experimental Investigation of Friction Coefficient and

- Wear Rate of Composite Materials Sliding Against Smooth and Rough Mild Steel Counterfaces. *Tribology in Industry*, Vol. 35, No. 4 (2013), strony 286-296
- [12] Danek, W. (2017). Wpływ gruntu na wartość współczynnika ASI w trakcie zderzenia pojazdu z wkopywanym, aluminiowym słupem oświetleniowym. W *II Międzynarodowa Interdyscyplinarna Konferencja Doktorantów Uczelni Technicznych, Prace Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Politechniki Śląskiej*, strony 3-13
- [13] Danek, W., Gąsiorek, D. (25.02-1.03.2017). Symulacja numeryczna zderzenia pojazdu z aluminiowym, wkopywanym słupem oświetleniowym. *Praca przedstawiona na 56 Sympozjon Modelowanie w Mechanice*, strona 60
- [14] Danek, W., Pawlak, M. (2016). Symulacja numeryczna zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym. W *I Międzynarodowa Interdyscyplinarna Konferencja Doktorantów Uczelni Technicznych, Prace Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Politechniki Śląskiej*, strony 22-32
- [15] Danek, W., Mężyk, A., Świtoński, E., Gąsiorek, D. (2016). Wyznaczanie współczynników bezpieczeństwa biernego przy zderzeniu pojazdu ze słupem oświetleniowym na podstawie symulacji numerycznej. *Praca przedstawiona na XIV Konferencja naukowo-techniczna TKI 2016*
- [16] Danek, W., Pawlak, M. (2018). Charpy Impact Testing Machine in Modeling of Vehicle Frontal Crash with street lights. *Springer Proceedings in Mathematics and Statistics: Dynamic Systems and Applications*, strony 73-84
- [17] Dudda, W., Domański, J. (2017). Analiza wytrzymałościowa quasi-autonomicznego słupa oświetleniowego z wykorzystaniem systemów CAD/CAE. *Mechanik*, strony 597-599
- [18] Eksi, S., Genel, K. (2016) Comparison of Mechanical Properties of Unidirectional and Woven Carbon, Glass and Aramid Fiber Reinforced Epoxy Composites. *Acta Physica Polonica*, No. 3-II, strony 879-882
- [19] Eppinger, R. (1999). Development of improved injury criteria for the assessment of advanced automotive restraint systems –II. *National Highway Traffic Safety Administration*
- [20] Fagerlinda, H., Brownb, J., Bálint, A. (2017). A novel approach to study the health consequences of road crashes. *Journal of Transport & Health* 7 (2017), strony 280–287

- [21] Fasanella, E. L., Jackson, K. E. (2002). Best Practices for Crash Modeling and Simulation. Hampton: *NASA Langley Research Center*
- [22] Fasanella, E., Jackson, K. (2009). Developing Soil Models for Dynamic Impact Simulations. Hampton: *NASA Langley Research Center*
- [23] Fasanella, E., Jackson, K., S., K. (2008). Soft soil impact testing and simulation of aerospace structures. *Praca przedstawiona na 10th LS-DYNA Users Conference. Dearborn*
- [24] Fechová, E., Kmech, J., Vagaská, J., Kozak D. (2016). Material Properties and Safety of Cars at Crash Tests. *Procedia Engineering 149 (2016),* strony 263 – 268
- [25] Goniewicz, K., Goniewicz, M. (2014). Europejskie inicjatywy na rzecz poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego. *Bezpieczeństwo pracy 9/2014,* strony 24-29
- [26] Goldberg, D. E. (2003) Algorytmy genetyczne i ich zastosowanie. Warszawa: *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*
- [27] Greń, J. (1974). Statystyka matematyczna modele i zadania. Warszawa: *Państwowe Wydawnictwo Naukowe*
- [28] Hallquist, J. O. (2006). LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corp., Livemore
- [29] Hallquist, J. O. (2007). LS-DYNA Keywords User`s Manual, Livermore Software Technology Corp., Livemore
- [30] Hickey, A., Xiao, S. (2017). Finite Element Modeling and Simulation of Car Crash. *International Journal of Modern Studies in Mechanical Engineering (IJMSME) Volume 3, Issue 1,* strony 1-5
- [31] Horr, A. M., Hartmann, M., Kronsteiner, J. (2016). Advanced dynamic & crash simulation of lightweight profiles for design of roadside infrastructure. *Transportation Research Procedia 14,* strony 4180 – 4189
- [32] Huan, Q., Yi, G., Zijian, L., Yu, L., Haolong Z. (2018). Shape optimization of automotive body frame using an improved geneticalgorithm optimizer. *Advances in Engineering Software 121 (2018),* strony 235–249
- [33] Jackowski, J., Żmuda, M. (2015). Identyfikacja przemieszczenia i obciążeń użytkowników pojazdu specjalnego podczas zderzeń. *Logistyka 4/2015,* strony 3742-3751

- [34] Jackowski, J., Wieczorek, M., Żmuda M. (2014). Badania eksperymentalne zderzeń z małymi prędkościami (z udziałem manekina i człowieka). *Logistyka* 3/2014, strony 2434-2443
- [35] Janszen, G. (2007). Vehicle crash test against a lighting pole: experimental analysis and numerical simulation. *Safety and Security Engineering II*, strony 347-355
- [36] Jędrzejczyk, Z., Kukuła, K., Skrzypek, J., Walkosz, A. (2011). Badania operacyjne w przykładach i zadaniach. Warszawa: *Wydawnictwo Naukowe PWN*
- [37] Jureczko, M. (2009) Metody optymalizacji - przykłady zadań z rozwiązaniami i komentarzami. Gliwice: *Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego*
- [38] Kaczmarczyk, J., Grzyb, R., Rojek, M., Wróbel, G. (2006). Rozwiązanie konstrukcyjne aluminiowych słupów do zawieszenia sygnalizacji świateł drogowych. *Modelowanie Inżynierskie tom 1*, strony 233-238
- [39] Kaliński K. J., Chodnicki M., Kowalska B., Kmita P. (2015). Analysis of crash computation on a basis of principle of linear momentum and kinetic energy. *Mechatronics: Ideas, Challenges, Solution and Applications*, strony 113-129
- [40] Kankariya, K., Sayyad, F.B. (2015). Numerical Simulation of Bumper Impact Analysis and To Improve Design for Crash Worthiness. *The International Journal Of Engineering And Science (IJES), Volume 4, Issue 5*, strony 58-66
- [41] Kiczko, A., Niezgoda, T., Nowak, J., Dziewulski, P. (2010). Numerical implementation of car impact into the modified road barrier. *J. Kones Powertrain Transp*, strony 189-196
- [42] Kohler, J., Frank, T., Feucht, M. (2004) Today's challenges in crash simulation. *Praca przedstawiona na 7th European LS-DYNA Conference*
- [43] Kołakowski, Z. (2008). Podstawy wytrzymałości i stateczności płytowych konstrukcji kompozytowych. Łódź: *Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej*
- [44] Kondo, K., Makino M. (2009). Crash Simulation of Large_Number-of-Elements Car Model by LS-DYNA on Highly Parallel Computers. Fujitsu *scientific & technical journal. Volume 44, No.4*, strony.467-474
- [45] Kumar, M., Naik, N. K. (2018). Prediction of mechanical behavior of composites under high strain rate tensile loading. *Mechanics Research Communications* 90 (2018), strony 1–7

- [46] Lakusic, V. T. (2012). The safety of roadside columns in the event of vehicle impact. *Gradevinar 64(2012)* , strony 305-313
- [47] Lévesque, M., Gilchrist, M. D., Fisa B. (2003) A Theoretical Study of the Tensile Test for Highly Anisotropic Composite Materials. *Composite Materials: Testing and Design, Fourteenth Volume. ASTM International*, strony 320-335.
- [48] Lin, C., Chou, K., Yu, C. (2014). Numerical Simulation of Vehicle Crashes. *Applied Mechanics and Materials Volume 590*, strony 135-143
- [49] Marzougui, D., Samaha, R. R., Cui, C., C., K., Opiela, K. S. (2012). Extended Validation of the Finite Element *Model for the 2010 Toyota Yaris Passenger Sedan. NCAC*
- [50] Mei, L., Thole, C. A. (2008). Data analysis for parallel car-crash simulation results and model optimization. *Simulation Modelling Practice and Theory 16*, strony 329–337
- [51] Michalewicz, Z. (2003). Algorytmy genetyczne + struktury danych = programy ewolucyjne. *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*
- [52] Michałek, J. (2013). Bezpieczeństwo bierne słupów oświetleniowych. *Drogownictwo* , strony 249-255
- [53] Michałek, J. (2011) Słupy oświetleniowe z betonu. *Przegląd budowlany 6/2011*. strony 45-49
- [54] Mongiardini, M. (2005) Geo-Metro Finite Element model (GM_R3): Improvements of Steering System and Suspensions, Department of Aerospace engineering - Politecnico di Milano
- [55] Naik, N., Kumar, R. S. Compressive strength of unidirectional composites: evaluation and comparison of prediction models
- [56] Nassiopoulos, E. Njuguna, J. (2011) Finite element dynamic simulation of whole rallying car structure :Towards better understanding of structural dynamics during side impacts. Praca przedstawiona na 8th European LS-DYNA Users Conference, Strasbourg - May 2011
- [57] Nasution, R. P., Siregar, R. A., Fuad, K., Adom, A. H. (2009). The Effect of ASI (Acceleration Severity Index) to Different Crash Velocities. *Proceedings of International Conference on Applications and Design in Mechanical Engineering*, strony 6H-1-6H-6

- [58] Nguyen, P. T., Lee, J. Y., Yim, H. J., Lee, S. B., & Heo, S. J. (2015). Analysis of vehicle structural performance during small-overlap frontal impact. *International Journal of Automotive Technology* , strony 799-804
- [59] Niezgodą, T., Barnat, W., Dziewulski, P., Kiczko, A. (2013) Modelowanie numeryczne i symulacja drogowych testów zderzeniowych z wykorzystaniem zaawansowanych systemów CAD/CAE. *Journal of KONBiT* 3(23)2012, strony 95-108
- [60] Nycz, D. (2015). Modelowanie i badania numeryczne testów zderzeniowych bariery klasy N2-W4-A na łukach dróg. Praca doktorska. Warszawa: Wydawnictwo WAT
- [61] Ochelski, S. (2004). Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne
- [62] Pawlak, M. (2015). Comparison of acceleration severity index of vehicle impacting with permanent road equipment support structures. *Praca przedstawiona na 13th Conference on Dynamical Systems Theory and Application*. Łódź
- [63] Pawlak, M. (2016). The Acceleration Severity Index in the impact of a vehicle against permanent road equipment support structures. *Mechanics Research Communications* 77, strony 21-28
- [64] Pawlus, W., Robbersmyr K. G., Karimi H. R. (2011). Mathematical modeling and parameters estimation of a car crash using data-based regressive model approach. *Applied Mathematical Modeling* 35, strony 5091-5107
- [65] Pawlus, W., Nielsen, J. E., Karimi H. R., Robbersmyr K. G (2010). Development of Mathematical Models for Analysis of a Vehicle Crash. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, Issue 2, Volume 5*, strony 156-165
- [66] PN-EN 40-1: 2002 Słupy oświetleniowe - Terminy i definicje
- [67] PN-EN 40-2:2005 Słupy oświetleniowe Część 2 : Wymiagania ogólne i wymiary
- [68] PN-EN 40-3-1:2013 Słupy Oświetleniowe, Część 3.1: Projektowanie i weryfikacja, Obciążenia charakterystyczne
- [69] PN-EN 40-3-2:2013 Słupy Oświetleniowe, Część 3.2: Projektowanie i weryfikacja, Weryfikacja za pomocą badań
- [70] PN-EN 40-3-3:2013 Słupy Oświetleniowe, Część 3.3: Projektowanie i weryfikacja, Weryfikacja za pomocą obliczeń

- [71] PN-EN 40-7 Słupy oświetleniowe, Część 7: Słupy oświetleniowe z kompozytów polimerowych wzmocnianych włóknem szklanym - wymagania.
- [72] PN-77 B-02011:1977/Az1:2009 Obciążenie wiatrem - Obciążenia w obliczeniach statycznych
- [73] PN-EN ISO 527-1:2012 Tworzywa sztuczne - Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu - Część 1: Zasady ogólne.
- [74] PN-EN ISO 527-5:2012 Tworzywa sztuczne -- Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu -- Część 5: Warunki badań kompozytów tworzywowych wzmocnionych włóknami jednokierunkowo
- [75] PN-EN 1317-1:2010 Systemy ograniczające drogę Część 1: Terminologia i ogólne kryteria badań
- [76] PN-EN 12767:2003 Bierne bezpieczeństwo konstrukcji wsporczych dla urządzeń drogowych, Wymagania i metody badań
- [77] Ratingen, M., Williams, A., Lie, A., Seeck, A., Castaing, P., Kolke, R., Adriaenssens, G., Miller, A. (2016). *The European New Car Assessment Programme: A historical review. Chinese Journal of Traumatology 19*, strony 63-69
- [78] Rusiński, E. (1994). *Metoda Elementów Skończonych*. Warszawa: Wydawnictwo *Komunikacji i Łączności*
- [79] Schweizerhof, K., Weimar, K., Munz, T., Rottner, T. Crashworthiness Analysis with Enhanced Composite Material Model in LS-DYNA - Merits and Limits
- [80] Seńsko, J., Skoniecki, P. (2011). Symulacyjne badania odkształceń nadwozia samochodu. *Logistyka* , strony 2423-2432
- [81] Shojaati M. (2003). Correlation between injury risk and impactseverity index ASI. *Praca przedstawiona na 3rd Swiss Transport Research Conference, Ascona*
- [82] Stadnicki, J. (2006). *Teoria i praktyka rozwiązywania zadań optymalizacji*. Warszawa: *Wydawnictwo Naukowo-Techniczne*
- [83] Sun, T., Liu, J., Shen, I., Ma, Y. (2002). Numerical Simulation of Car Crash Analysis Based on Distributed Computational Environment. *Proceedings of the Fifth International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing (ICA3PP'02)*
- [84] Suresha, B., Chandramohan G., Samapthkumaran, P., Seetharamu, S., Vynatheya, S. (2006). Friction and Wear Characteristics of Carbon-epoxy and Glass-epoxy

Woven Roving Fiber Composites. *Journal of REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES*, Vol. 25, No. 7/2006, strony 771-781

- [85] Szymczak-Graczyk A. (2011). Obciążenie wiatrem budynków. *Architectura 10* (4), strony 25-32
- [86] Teng, T., Wu, C. (2011). Numerical Simulation of Side Impact Crashes. *Information Technology Journal Volume 10* (7). strony 1462-1467
- [87] Thomas, M. A., Chitty, D. E., Gildea, M. L., T'Kindt, C. M. (2008) Constitutive Soil Properties for Unwashed Sand and Kennedy Space Center. *NASA/CR-2008-215334*
- [88] Wach, W. (2012). Crash against mast according to EN 12767 standard – uncertainty of passive safety indexes calculated in programs for simulation of vehicle accidents, *Praca przedstawiona na 21th Annual Congress of the European Association for Accident Research and Analysis (EVU)*, Braşov
- [89] Wade, B., Feraboli, P., Osborne, M., Rassaian, M. (2015). Simulating laminated composite materials using ls-dyna material model mat54: single-element investigation. *Automobili Lamborghini Advanced Composite Structures Laboratory. Raport z wykonanych prac*
- [90] Yadav, S., Pradhan, S. K. (2014). Investigations into Dynamic Response of Automobile Components during Crash Simulation. *Procedia Engineering 97*, strony 1254 – 1264
- [91] Yuanpeng, L. (2013). Simulation of Vehicle's Frontal Crash with Dummy inside. *Proceedings of the 2th International Conference on Computer Science and Electronics Engineering*, (strony 2992-2995)

Strony internetowe

- [92] Advanced Full-Field Displacement and Strain Analysis. Digital 3D Image Correlation System Q-400
www.ita-polska.com.pl/upload/documents/DantecDynamics_Product-Brochure_Q_400DIC1.pdf (dostęp 7.05.2018)
- [93] Alumast - strona internetowa producenta kompozytowych słupów oświetleniowych
www.slupyoswietleniowe.pl/slupy_kompozytowe/ (dostęp 11.10.2018)
- [94] Bezpieczeństwo na drodze jest dla nas priorytetem
blog.slupyoswietleniowe.pl/tag/wytrzymalosc-kompozytu (dostęp 3.10.2018)

- [95] Dekada działań na rzecz bezpieczeństwa ruchu drogowego 2011-2020
www.policja.pl/pol/aktualnosci/65631,Dekada-dzialan-na-rzecz-bezpieczenstwa-ruchu-drogowego-2011-2020.html (dostęp 3.10.2018)
- [96] Krajowy Program Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego 2005-2007-2013 GAMBIT 2005, Ministerstwo Infrastruktury, Warszawa 2005
www.embud.szczecin.pl/pdf/gambit.pdf (dostęp 19.09.2018)
- [97] LS DYNA Support
<https://www.dynasupport.com/tutorial/contact-modeling-in-ls-dyna/contact-types> (dostęp 1.03.2019)
- [98] LS-DYNA Aerospace Working Group
https://awg.lstc.com/tiki-download_file.php?fileId=17 (dostęp 1.03.2019)
- [99] Narodowy Program Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego 2013-2020, Krajowa Rada Bezpieczeństwa ruchu Drogowego, Warszawa 2013
www.krbrd.gov.pl/files/file/NP-BRD-2020_przyjety_przez_KRBRD.pdf (dostęp 19.09.2018)
- [100] National Crash Analysis Center (NCAC)
<https://www.fhwa.dot.gov> (dostęp 24.10.2018)
- [101] MTS Criterion Series 40 Electromechanical Universal Test Systems
www.mts.com/cs/groups/public/documents/library/mts_06225 (dostęp 7.05.2018)
- [102] Phantom Camera Hardware User Manual
<https://phantomhighspeed-service.force.com/servlet/servlet.FileDownload?file=00P1N00000dSu7aUAC&oid=00D1N000002Br2EUAS> (dostęp 24.09.2018)
- [103] Phantom V9.1 broszura informacyjna
<http://www.adept.net.au/cameras/visionresearch/pdf/PhantomV91.pdf> (dostęp 24.09.2018)
- [104] Statystyka: regresja i korelacja
home.agh.edu.pl/~bartus/index.php?action=dydaktyka&subaction=statystyka&item=regresja_i_korelacja (dostęp 06.03.2018)
- [105] Tema Automotive broszura informacyjna
<http://www.imagesystems.se/download/public/brochures/TEMA-AUTOMOTIVE-BROCHURE-2017.pdf> (dostęp 24.09.2018)
- [106] Własności mechaniczne materiałów inżynierskich
<http://www.varminal.com/aengr.htm> (dostęp 31.07.2018)

[107] Wypadki drogowe - raporty roczne

statystyka.policja.pl/st/ruch-drogowy/76562,Wypadki-drogowe-raporty-roczne.html (dostęp 7.05.2018)

Streszczenie

W pracy przedstawiono rezultaty prac związane z wpływem wybranych parametrów na wartość współczynników bezpieczeństwa biernego trakcie zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym. Badania te dotyczyły słupów wykonanych z materiału kompozytowego. Uzyskane wyniki zostały porównane z wynikami uzyskanymi dla słupów wykonanych z aluminium, które jest materiałem, który jest najczęściej stosowany jako materiał konstrukcyjny na słupy. Wykonany model numeryczny zderzenia pojazdu ze słupem oświetleniowym został zweryfikowany na podstawie wyników uzyskanych z badań doświadczalnych. Weryfikacja polegała na porównaniu wartości współczynnika ASI oraz analizy porównawczej chwil zderzenia uzyskanych z badań doświadczalnych oraz testów wirtualnych. Parametry modelu materiałowego kompozytu zostały określone na podstawie badań doświadczalnych realizowanych na maszynie wytrzymałościowej. W celu redukcji wartości współczynników bezpieczeństwa biernego zaproponowano dwa podejścia. Pierwsze dotyczyło określenia wpływu grubości ścianki słupa oświetleniowego na wartości współczynników ASI oraz THIV. Natomiast drugie wpływu położenia środka masy na wartość tych współczynników.

Abstract

The paper presents the results of work related to the impact of selected parameters on the value of passive safety coefficients during car crash with lighting column. These studies concerned lighting columns made of composite material. The obtained results were compared with the results obtained for aluminum lighting column, which is the material that is most often used as a structural material for columns. The numerical model of car crash with the lighting column was verified based on the results obtained from the experimental tests. The verification consisted in comparing the value of the ASI coefficient and the comparative analysis of collision moments obtained from experimental and virtual tests. The parameters of the composite material model were determined on the basis of experimental tests carried out on a durability machine. In order to reduce the value of passive safety coefficients, two approach was. The first concerned determining the influence of the wall thickness of the lighting column on the values of ASI and THIV. On the other hand, the second influence of the position of the center of mass on the value of these factors.