

# Wstęp do analizy odkształceń fotelika samochodowego do przewozu dziecka w trakcie kolizji na podstawie wykonanych symulacji

Bartosz Zdunek, Krzysztof Sawala, Stanisław Taryma

**Słowa kluczowe:** fotelik, symulacje, przemieszczenia, naprężenia

## Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki symulacji statycznej i dynamicznej fotelika samochodowego do przewozu dziecka.

## Przyczyna i cel stosowania fotelików

Dzieci są szczególnie narażone na niebezpieczeństwo podczas wypadku samochodowego. Ze względu na zupełnie inne proporcje poszczególnych części ciała oraz słabsze mięśnie nie są one w stanie przeciwstawić się siłom bezwładności tak skutecznie, jak dorośli pasażerowie. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na zwiększenie ryzyka odniesienia przez dzieci poważnych obrażeń podczas kolizji, jest mniejsza wytrzymałość biomechaniczna ich ciała w stosunku do osób dorosłych.

Głowa noworodka stanowi 25% całkowitej masy jego ciała, podczas gdy głowa dorosłego mężczyzny stanowi tylko 6% jego masy. Wcześniej wymieniony udział masy głowy dziecka w całkowitej masie jego ciała przekłada się na niekorzystny rozkład sił bezwładności działających na ciało dziecka podczas wypadku. Bardzo intensywnym przeciążeniem ulega, bowiem odcinek szyjny kręgosłupa oraz głowa dziecka. Uwzględniając, iż zarówno czaszka, jak i kręgosłup dziecka nie są w pełni rozwinięte, a zatem mają one obniżoną wytrzymałość biomechaniczną, istnieje bardzo duże prawdopodobieństwo wystąpienia groźnych urazów tych części ciała dziecka podczas kolizji.

W obecnej chwili jedynym elementem konstrukcyjnym znacząco poprawiającym poziom bezpieczeństwa podróżujących dzieci są dostosowane do ich wieku, wzrostu i wagi foteliki samochodowe.

## 1. Typ fotelika wybrany do symulacji

Foteliki zaliczane do grupy I (9-18kg) przeznaczone są dla dzieci w wieku do 3 lat. Na ogół montowane są przodem do kierunku jazdy i mają trzy- lub pięciopunktowe pasy wewnętrzne.

## 2. Symulacja testu zderzeniowego w programie Working Model 2D

W celu wstępnego zapoznania się z tematyką przeprowadzania prób zderzeniowych i zachowania ludzkiego ciała podczas kolizji drogowych (tj. zagadnieniami niezbędnymi do dalszych analiz numerycznych) przygotowano płaski model

testu zderzeniowego w programie Working Model 2D. Sformułowany model próby zderzeniowej w sposób przybliżony odpowiada typowym testom zderzeniowym przeprowadzanym przez organizacje zajmujące się badaniem poziomu bezpieczeństwa zapewnianego przez współczesne samochody osobowe oraz stosowanych w nich systemów bezpieczeństwa.

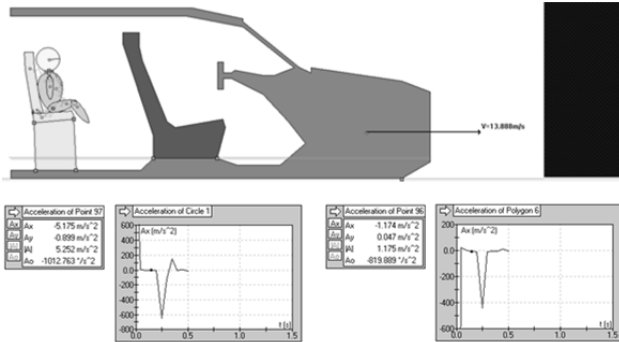
## 3. Budowa modelu

Model został przygotowany dwu etapowo. W pierwszym etapie stworzono model przeszkody i karoserii samochodu (rys. 1), uwzględniając podstawowe kształty, wymiary oraz masę typowej konstrukcji stosowanej w testach zderzeniowych. W procesie modelowania współczynniki sztywności i tłumienia karoserii oraz przeszkody dobrano jakościowo, dla osiągnięcia podobnych wartości przyspieszeń działających na manekina, do tych występujących w rzeczywistych próbach zderzeniowych. W drugim etapie przygotowano model fotelika samochodowego dla dziecka oraz model manekina (rys. 1), odzwierciedlający dziecko w wieku trzech lat. Poszczególne elementy budowy anatomicznej manekina wykonane zostały w postaci brył sztywnych, które zostały połączone przegubowo elementami sprężysto-tłumiącymi. Siedzisko i oparcie fotelika samochodowego dla dziecka zostały sformułowane, jako bryły sztywne, połączone przegubowo elementem sprężysto-tłumiącym. W celu połączenia fotelika samochodowego dla dziecka z karoserią samochodu zastosowano więzy sztywne, zaś model integralnych pasów bezpieczeństwa fotelika samochodowego wykonano w postaci zespołu elementów sprężystych.

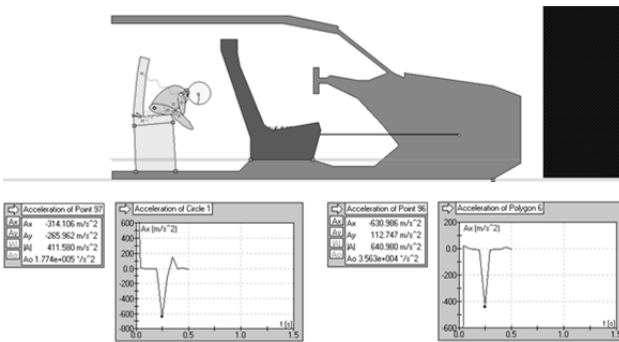
Podobnie, jak podczas badań dynamicznych przeprowadzanych w procesie homologacji fotelików samochodowych dla dzieci, karoserii samochodu wraz z fotelikiem i umieszczonym na nim manekinem, nadano prędkość 50 km/h (13,89 m/s) (rys. 1). Z prędkością tą badany układ uderza w przeszkodę w postaci utwierdzonej do podłoża bariery (rys. 2). W chwili uderzenia w wyniku oddziaływania siły bezwładności manekin doznaje znacznego przemieszczenia w kierunku osi wzdłużnej karoserii. Siła bezwładności przenoszona przez pasy bezpieczeństwa na konstrukcję fotelika samochodowego dla dziecka, powoduje przemieszczenie kątowne oparcia fotelika, odzwierciedlające ugięcie oparcia występujące w rzeczywistej konstrukcji.

Na rysunku 2 widoczne poniżej modelu tabele przedstawiają od lewej strony: wyniki liczbowe przyspieszenia głowy (w osi x, w osi y, wypadkowe, kątowne), wyniki graficzne wypadkowego

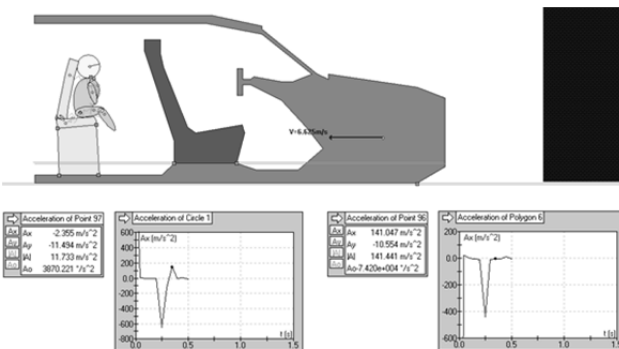
przyspieszenia głowy, wyniki liczbowe przyspieszenia klatki piersiowej (w osi x, w osi y, wypadkowe, kątowe), wyniki graficzne wypadkowego przyspieszenia klatki piersiowej. Maksymalne wartości wypadkowego przyspieszenia głowy i maksymalnego wypadkowego przyspieszenia klatki piersiowej zanotowano tuż po uderzeniu w przeszkodę i wyniosły one odpowiednio: -65,32 g (-640,98 m/s<sup>2</sup>) oraz -41,97 g (-411,58 m/s<sup>2</sup>). Rysunek 3 prezentuje końcową fazę symulacji, w której badany układ powraca do stanu równowagi.



Rys. 1. Początkowa faza symulacji testu zderzeniowego [1]



Rys. 2. Faza tuż po uderzeniu karoserii w barierę [1]



Rys. 3. Faza powrotu badanego układu do stanu równowagi [1]

Przeprowadzona analiza pozwoliła na zdobycie niezbędnej wiedzy o testach zderzeniowych z zakresu kinematyki ruchu poszczególnych części ciała dziecka podczas zderzenia czołowego. Stworzony model umożliwia przeprowadzenie symulacji numerycznych ruchu ciała dziecka w trakcie kolizji drogowej i analizę wartości oraz przebiegu w czasie przyspieszeń działających na poszczególne części jego ciała.

Otrzymane wyniki przyspieszeń głowy i klatki piersiowej, choć zbliżone zarówno, co do wartości, jak i przebiegu w czasie do uzyskiwanych w rzeczywistych testach zderzeniowych, można traktować jedynie w sposób jakościowy z powodu niepełnej wiedzy o współczynnikach sprężysto-tłumiących poszczególnych elementów badanego układu oraz ze względu na liczne uproszczenia zastosowane w procesie modelowania

### 3. Statyczna analiza wytrzymałościowa fotelika samochodowego

Celem analizy jest sprawdzenie poziomu bezpieczeństwa konstrukcji fotelika samochodowego dla dzieci, obciążonego statycznie maksymalnymi siłami przenoszonymi przez pasy bezpieczeństwa oraz maksymalnym przyspieszeniem występującym w trakcie testów zderzenia czołowego, poprzez wyznaczenie przemieszczeń wypadkowych, odkształceń zredukowanych oraz naprężeń zredukowanych i porównanie ich z wartościami dopuszczalnymi dla przyjętych materiałów.

### 4. Model geometryczny fotelika samochodowego dla dzieci

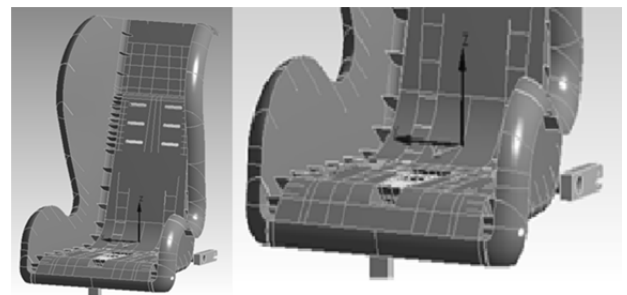
Analizę wytrzymałościową konstrukcji fotelika samochodowego dla dzieci przeprowadzono z wykorzystaniem własnego projektu fotelika, zaliczanego do I grupy fotelików samochodowych. Projekt został wykonany w programie Autodesk Inventor. Wymiary gabarytowe, grubość skorupy oraz żeber fotelika, a także materiały konstrukcyjne, dobrane zostały na podstawie analizy istniejących już konstrukcji, oferowanych przez kilku producentów fotelików samochodowych dla dzieci.

Fotelik składa się z trzech głównych podzespołów (rys. 4 i 5):

- siedziska wraz z oparciem (skorupy) – element z tworzywa sztucznego, wykonywany za pomocą technologii wtryskiwania;
- ramy z uchwytami mocującymi typu ISOFIX – konstrukcja kratownicowa wykonana z profili stalowych;
- podpórki – element wykonany z profili stalowych.

### 5. Globalny układ odniesienia

Globalny układ odniesienia (rys. 4), w którym kierunek osi x (kolor zielony), kierunek osi y (kolor czerwony), oś z skierowana w górę (kolor granatowy).



Rys. 4. Globalny układ odniesienia przyjęty do obliczeń [1]

### 6. Warunki podparcia modelu fotelika

Analizowanej konstrukcji fotelika samochodowego dla dzieci odebrano pięć stopni swobody. Na krawędziach uchwytów mocujących typu ISOFIX modelowi odebrano możliwość przemieszczania się w osiach x, y, z oraz możliwość obrotu w osiach y i z (rys. 5). Dolnej powierzchni podpórki, wspartej o podłogę samochodu, odebrano możliwość przemieszczenia w osi z (rys. 5).



**Rys. 5.** Podparcie modelu: w uchwytach ISOFIX (dwie małe strzałki), powierzchnia podparcia modelu na dolnym końcu podpórki (strzałka w lewym dolnym rogu) [1]

## 7. Obciążenia

W analizie zastosowano następujący rozkład przyspieszeń oraz sił działających na konstrukcję fotelika:

1. Stała przyspieszenia ziemskiego o wartości  $9,81 \text{ m/s}^2$  została rozłożona równomiernie na całej konstrukcji fotelika.
2. Maksymalne opóźnienie, jakie stosuje się w badaniach laboratoryjnych, którego wartość wynosi  $264,8 \text{ m/s}^2$  ( $27 \text{ g}$ ) zostało rozłożone na całej konstrukcji fotelika.
3. Maksymalna siła w pasach bezpieczeństwa wynosi  $700 \text{ N}$ . Przyjęte zostało najbardziej niekorzystne przyłożenie sił, odpowiadające najwyższemu punktowi mocowania pasów bezpieczeństwa na górnym pręcie znajdującym się w oparciu fotelika. W analizie pominięto wpływ tarcia pomiędzy pasami a powierzchniami styku pasów z konstrukcją fotelika.

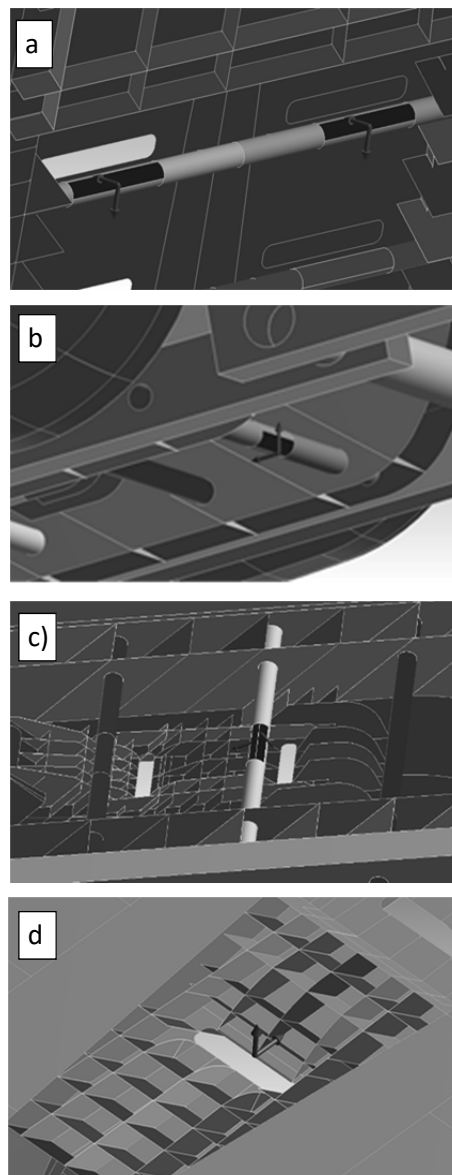
Na rysunku 6 wskazano miejsca przyłożenia (powierzchnie i krawędzie oznaczone kolorem czerwonym) oraz kierunki działania tych sił (czerwone strzałki).

## 8. Odształcenia

Wyniki analizy odkształceń zredukowanych badanego fotelika samochodowego dla dzieci wykazały, że największe odkształcenia konstrukcji występują w ściankach bocznych oraz w siedzisku fotelika (rys. 7-9). Obszary największych odkształceń pokrywają się z obszarami występowania największych naprężeń. Maksymalne obliczone odkształcenia, o wartości  $0,065 \text{ m/m}$  ( $6,50 \%$ ), występują w pobliżu krawędzi otworu środkowego w siedzisku, na którą naciska dolny środkowy odcinek pasa bezpieczeństwa (rys. 7 i rys. 9). W ściankach bocznych największe odkształcenia miały miejsce w łukach łączących ścianki boczne siedziska i oparcia (rys. 7). Odształcenia w tych miejscach nieznacznie przekroczyły wartość  $0,037 \text{ m/m}$  ( $3,70 \%$ ). W pozostałych obszarach odkształcenia rzadko przekraczały wartość  $0,01 \text{ m/m}$  ( $1,00 \%$ ), natomiast minimalna wartość obliczonych odkształceń wystąpiła w podpórce (rys. 9).

## 9. Naprężenia

Analiza naprężeń zredukowanych (Hubera-Misesa-Hencky'ego) wykazała, że wartości naprężeń niemal w całej konstrukcji skorupy fotelika samochodowego nie przekraczają granicy plastyczności materiału, z którego została ona wykonana (polipropylen,  $Re=22.106 \text{ Pa}$ ). W pięciu niewielkich obszarach granica plastyczności została jednak przekroczona (obszary oznaczone kolorem czerwonym na rysunkach 10-12). Największe wartości naprężeń w skorupie fotelika wystąpiły



**Rys. 6.** Wybrane miejsca przyłożenia i kierunki działania sił na elementy fotelika z oparciem: a) górny pręt zintegrowany b) dolny pręt zintegrowany z ramą, c) lokalny układ odniesienia przyjęty do rozkładu sił w przegrodzie mocowania barkowych pasów bezpieczeństwa, d) dolny pręt zintegrowany z siedziskiem, e) krawędź otworu w siedzisku [1]

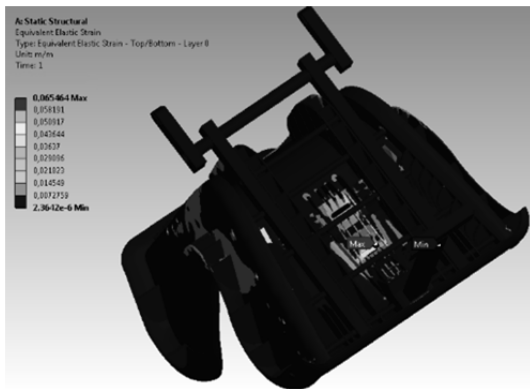
w pobliżu otworu środkowego w siedzisku i wyniosły  $6,12.107 \text{ Pa}$  ( $61,21 \text{ MPa}$ ) (rys. 12). W obszarze tym dojdzie do płynięcia plastycznego materiału. Ze względu na niemal trzykrotnie przekroczoną granicę plastyczności i znaczne odkształcenia bardzo prawdopodobne jest również wystąpienie pęknięć materiału. Duże wartości naprężeń zanotowano w łukach łączących ścianki boczne siedziska i oparcia (rys. 12). Maksymalna wartość naprężeń w tych obszarach przekroczyła  $3,53.107 \text{ Pa}$  ( $35,35 \text{ MPa}$ ). Skutkiem przekroczenia granicy plastyczności w tych miejscach mogą być odkształcenia plastyczne materiału oraz pęknięcia tworzywa sztucznego. Granica plastyczności materiału została również wyraźnie



przekroczona w miejscach mocowania górnego pręta w oparciu fotelika (rys. 12). Maksymalne wartości naprężeń wyniosły niemal 3,56.107 Pa (35,59 MPa). W obszarach tych bardzo prawdopodobne jest wystąpienie pęknięć materiału.



**Rys. 7.** Wyniki analizy: odkształcenia zredukowane, widok aksonometryczny z przodu i z tyłu (skala odkształceń 1:1) [1]

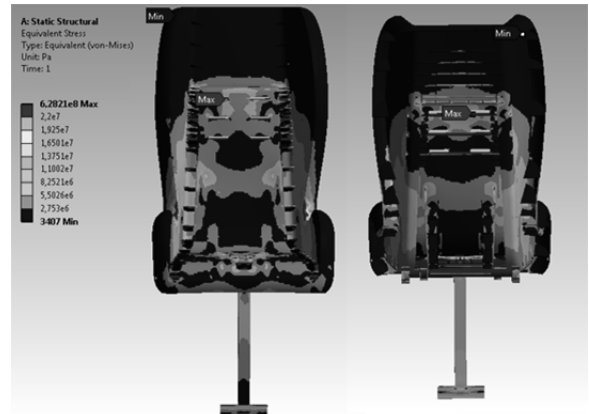


**Rys. 8.** Wyniki analizy: odkształcenia zredukowane, widok aksonometryczny z dołu (skala odkształceń 1:1) [1]

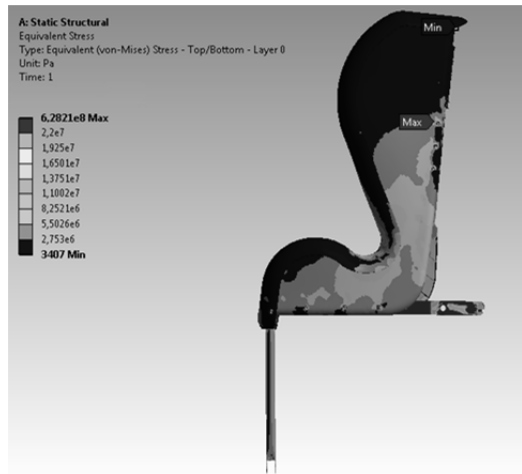


**Rys. 9.** Wyniki analizy: odkształcenia zredukowane, obszar występowania największych odkształceń (skala odkształceń 1:1) [1]

Granica plastyczności została przekroczona w wykonanym ze stali górnym pręcie zintegrowanym z oparciem fotelika (rys. 11 i 12). Naprężenie maksymalne wyniosło 6,28.108 Pa (628,21 MPa), co oznacza przekroczenie granicy plastyczności o ponad 82% (stal P355NH,  $R_e=345.106$  Pa). Następstwem tak dużych naprężeń będzie prawdopodobnie znaczne odkształcenie plastyczne pręta.



**Rys. 10.** Wyniki analizy: naprężenia zredukowane, widok z przodu i z tyłu [1]



**Rys. 11.** Wyniki analizy: naprężenia zredukowane, widok z boku [1]



**Rys. 12.** Wyniki analizy: naprężenia zredukowane, obszary o największych wartościach naprężeń w skorupie fotelika [1]

## 10. Dynamiczna analiza wytrzymałościowa konstrukcji fotelika samochodowego dla dzieci

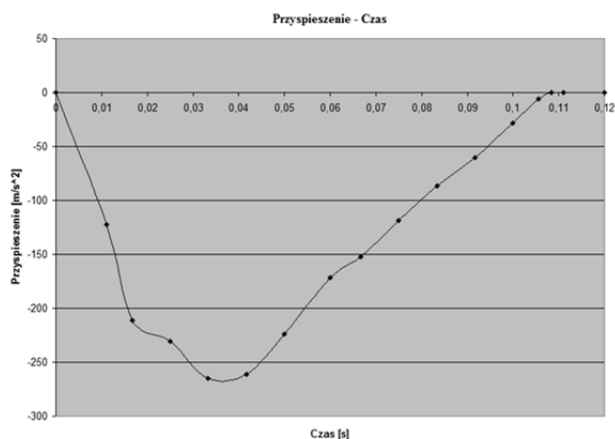
Celem analizy jest sprawdzenie poziomu bezpieczeństwa konstrukcji fotelika samochodowego dla dzieci, obciążonego dynamicznie zmiennymi siłami przenoszonymi przez pasy

bezpieczeństwa oraz zmiennym przyspieszeniem występującym w trakcie testów zderzenia czołowego, poprzez wyznaczenie przemieszczeń wypadkowych, odkształceń zredukowanych oraz naprężeń zredukowanych i porównanie ich z wartościami dopuszczalnymi dla przyjętych materiałów. Celem symulacji dynamicznej jest również porównanie wyników owej analizy z wynikami symulacji statycznej oraz weryfikacja ich zbieżności.

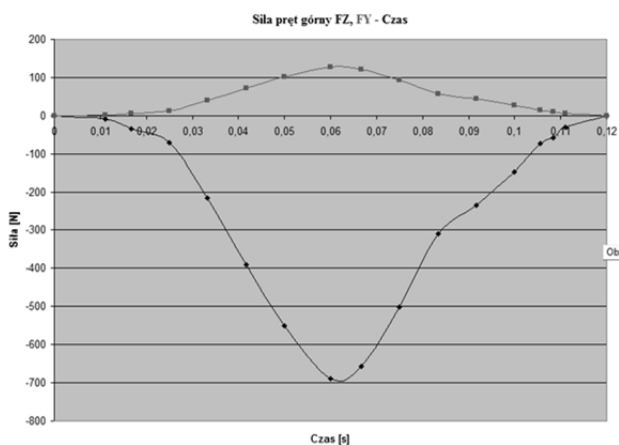
Analizę dynamiczną konstrukcji fotelika samochodowego przeprowadzono w programie ANSYS Workbench, w module Transient Structural.

## 11. Przemieszczenia

Wyniki analizy dynamicznej wykazały, że największe przemieszczenia wypadkowe występuje w górnej części oparcia badanego fotelika samochodowego dla dzieci (rys. 13). Maksymalne przemieszczenie o wartości niemal 0,18 m (176,43 mm) zanotowane zostało w 0,08 s (80 ms) analizy. Najmniejsze obliczone przemieszczenie wystąpiło w ramie stalowej badanego fotelika samochodowego i przekroczyło nieznacznie wartość  $1,79 \cdot 10^{-5}$  m (w przybliżeniu 0,02 mm).



Rys. 13. Przebieg przyspieszenia fotelika w zależności od czasu w trakcie testu zderzenia czołowego



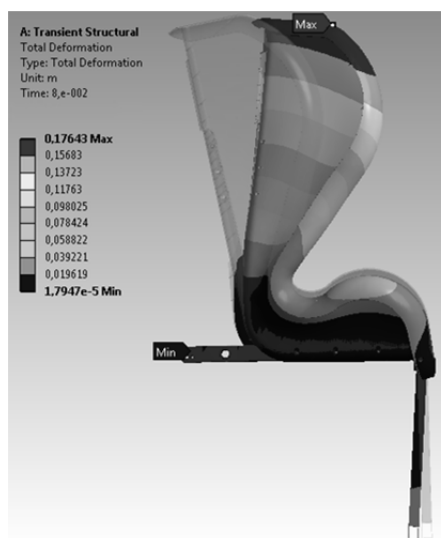
Rys. 14. Przebiegi sił działających na górny pręt zintegrowany z oparciem fotelika w zależności od czasu w trakcie testu zderzenia czołowego

## 12. Odkształcenia

Maksymalne odkształcenia wystąpiły w 0,08 s (80 ms) analizy. Obszary występowania największych odkształceń przedstawiono na rysunku 14. W pozostałych obszarach odkształcenia zredukowane miały małe wartości i zazwyczaj nie przekraczały 0,02 m/m (2,39%). Minimalna wartość obliczonych odkształceń wystąpiła w stalowej ramie fotelika (rys. 14).

## 13. Naprężenia

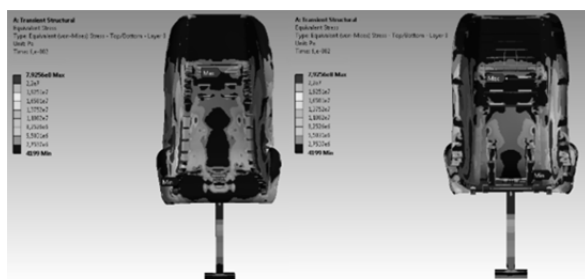
Analiza naprężeń zredukowanych (Hubera-Misesa) w module Transient Structural przeznaczonym do przeprowadzania symulacji dynamicznych wykazała istotne rozbieżności pomiędzy otrzymanymi tą metodą wynikami a wynikami uzyskanymi na drodze analizy statycznej. Granica plastyczności materiału skorupy fotelika samochodowego została przekroczona w większej ilości obszarów, a powierzchnia obszarów, w których w obydwu symulacjach wartości naprężeń były większe niż granica plastyczności materiału, okazała się również większa w przypadku obliczeń metodą dynamiczną.



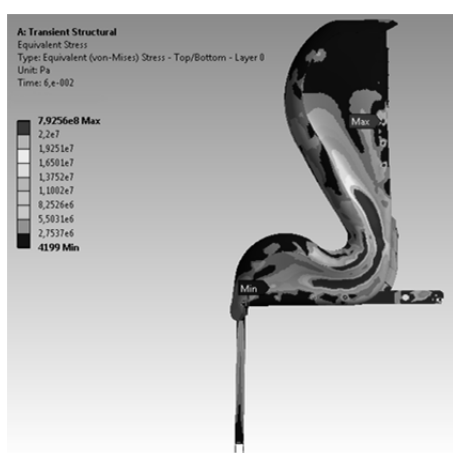
Rys. 15. Wyniki analizy: przemieszczenia wypadkowe, widok z boku z konturem nieobciążonego modelu (skala przemieszczeń 1:1) [1]



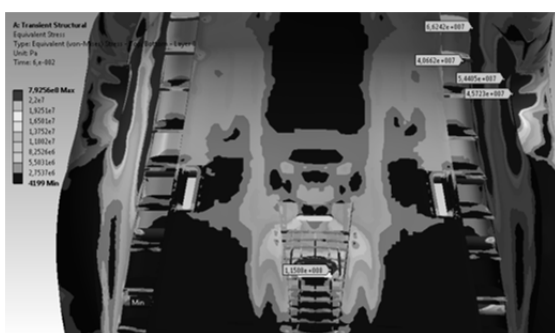
Rys. 16. Wyniki analizy: odkształcenia zredukowane, widok aksonometryczny z przodu i z tyłu (skala odkształceń 1:1) [1]



Rys. 17.. Wyniki analizy: naprężenia zredukowane, widok z przodu (po lewej), widok z tyłu (po prawej) [1]



Rys. 18. Wyniki analizy: naprężenia zredukowane, widok z boku [1]



Rys. 19. Wyniki analizy: naprężenia zredukowane, obszary o największych wartościach naprężeń w skorupie fotelika [1]

## Wnioski

Przeprowadzone analizy wytrzymałościowe badanego fotelika samochodowego dla dzieci wykazały, że istnieją duże rozbieżności pomiędzy wynikami uzyskanymi w symulacji statycznej a wynikami otrzymanymi w analizie dynamicznej.

Maksymalne przemieszczenie wypadkowe w symulacji dynamicznej okazało się większe o 272,29 % niż otrzymane w analizie statycznej.

Największe wartości odkształceń zredukowanych wystąpiły w innych miejscach dla obu analiz. Badanie dynamiczne wykazało, iż największe odkształcenia nastąpią w ściankach bocznych fotelika i będą większe niż odkształcenia w pobliżu krawędzi otworu środkowego, czyli strefy, która w obliczeniach statycznych została wskazana, jako obszar największych odkształceń zredukowanych. Wartość maksymalnych odkształceń zredukowanych uzyskanych w analizie dynamicznej okazała się o 228,88 % większa w analizie statycznej.

Symulacja dynamiczna wykazała ponadto, że granica plastyczności materiałów konstrukcyjnych zastosowanych w obliczeniach zostanie przekroczona w większej ilości obszarów. W badaniu dynamicznym ścianki boczne fotelika uległy silnemu sfaldowaniu (zjawisko, to nie wystąpiło w analizie statycznej), co świadczy o utracie stateczności badanej konstrukcji powłokowej.

Przyczyn rozbieżności wyników otrzymanych w symulacji statycznej i w symulacji dynamicznej należy upatrywać w następujących elementach procesu obliczeniowego:

- w symulacji dynamicznej uwzględniono oddziaływania zmiennych sił, a przede wszystkim zmiennej masowej siły bezwładności;
- w analizie dynamicznej uwzględniono nieliniowe zachowania materiałów;

Wyniki analizy dynamicznej są bardziej zbliżone z rzeczywistym zachowaniem i zjawiskami zachodzącymi w obiektach technicznych poddanych zmiennym w czasie obciążeniom. Cechują się większą dokładnością wyników. Analizę statyczną można traktować jako sprawdzenie modelu obliczeniowego.

## Bibliografia

1. Sawala K., „Analizy odkształceń fotelika samochodowego do przewozu dziecka w trakcie kolizji na podstawie wykonanych symulacji”, praca magisterska

## Autorzy:

mgr inż., **Bartosz Zdunek** – Politechnika Gdańska,  
mgr inż., **Krzysztof Sawala** – Politechnika Gdańska,  
dr hab. inż., **Stanisław Taryma** – Politechnika Gdańska.

## Introduction in to the analysis of the deformation of a child car seat during a collision based on simulations

The article presents the results of static and dynamic simulations of the child car seat.

**Key words:** child car seat, simulations, displacements, stresses.