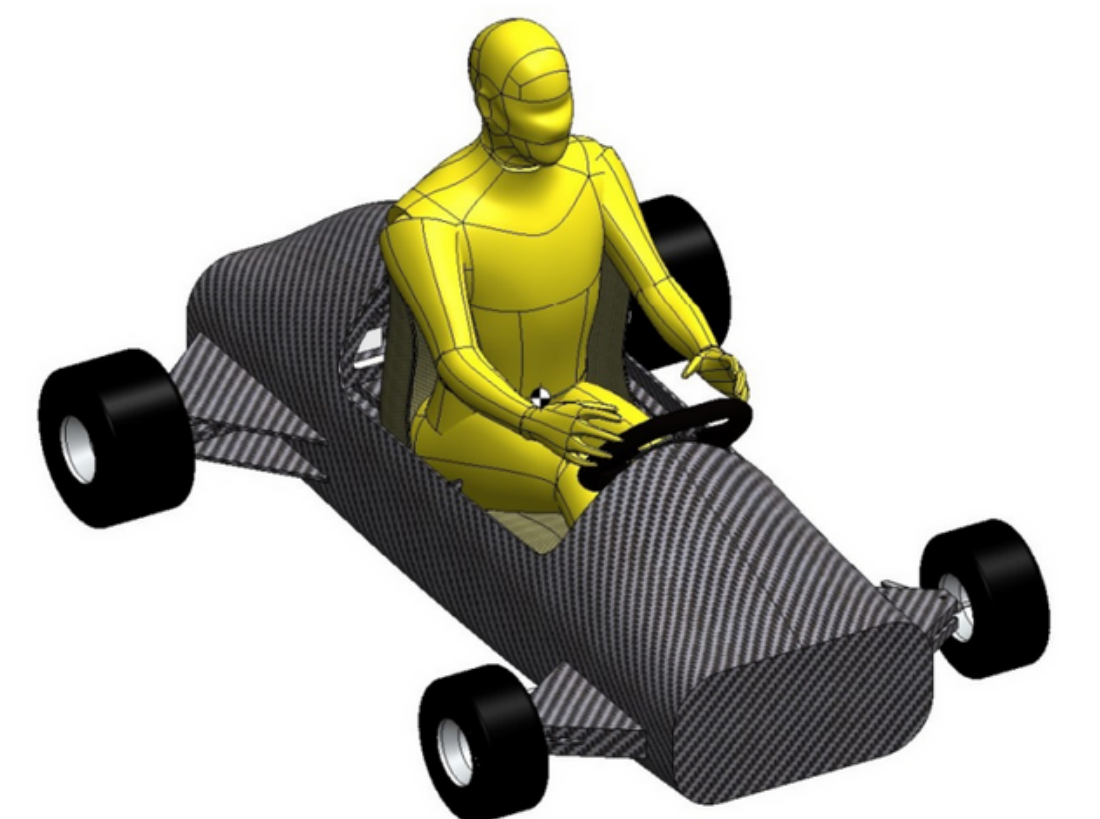


Kompozytowe monokoki nie weszły jeszcze do świata kartingu mimo, że najciekawszym zastosowaniem włókna węglowego jest wykorzystanie go do budowy całych nadwozi, jak ma to miejsce w bolidach Formuły 1 lub u producentów sportowych hipersamochodów. W dzisiejszych czasach każdy kierowca pragnący awansować do Formuły 1 powinien rozpocząć swoją przygodę z motorsportem od kartingu. W motorsporcie coraz częściej jest używane włókno węglowe, ponieważ zauważono jego wyjątkowe właściwości mechaniczne i wytrzymałościowe. W pojazdach wyścigowych elementy stalowe i aluminiowe zostają zastąpione przez laminaty z włókna węglowego. Wobec tej potrzeby celem mojej pracy było zbudowanie od podstaw w środowisku SolidWorks ramy z rur stalowych oraz monokoku z kompozytu przekładkowego wzmocnianego włóknem węglowym do gokarta elektrycznego oraz ich porównanie.



### Projekt stalowej ramy

Zaprojektowałem ramę kratownicową, z rur połączonych ze sobą metodą spawania. Użyłem jako materiału stali konstrukcyjnej o podwyższonej wytrzymałości - S355J2G3. Tak zaprojektowana rama pozwala na dowolne dobranie napędu elektrycznego oraz bezinwazyjne mocowanie akumulatorów trakcyjnych i sterownika silnika, co nie byłoby możliwe w popularnych konstrukcjach.

Projekt tej ramy został opracowany tak, aby spełniał wymogi dotyczące wymiarów gokarta, wobec czego jest alternatywą dla tradycyjnej ramy dopuszczanej do jazdy po torze kartingowym. Rama powstała ze stalowych cienkościennych rur zespawanych ze sobą. Wymiary rur użytych do projektu modelu: 16 rur 24 x 3 [mm], 10 rur 22 x 2 [mm] oraz 13 rur 16 x 2 [mm]. Przedstawione przekroje rur połączone ze sobą metodą spawania to najkorzystniejsze rozwiązanie do zbudowania konstrukcji, która ma wytrzymać naprężenia skrętne, gięte oraz zmechniowe.

Konstrukcje gokartów podlegają restrykcyjnym przepisom, wobec tego swoje projekty wzorowałem na ramie stalowej używanej w kartingu.

### Metoda elementów skończonych

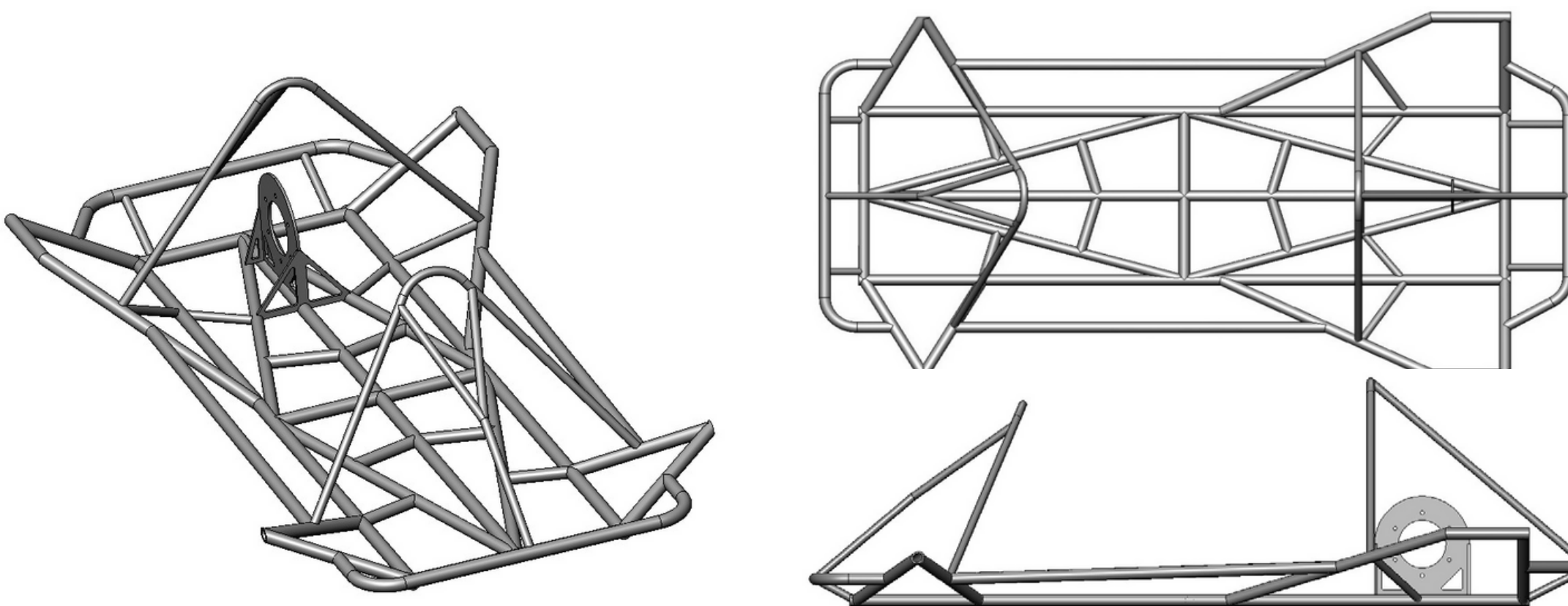
Do obliczeń MES posłużył mi dodatek Simulation w SolidWorksie, w którym zostały zamodelowane obie konstrukcje. To rozwiązanie pozwala konstruktorowi na szybkie sprawdzenie efektu projektowania i konstruowania wszystkich części, jak i złożonego modelu, bez konieczności konwertowania plików z modelem do innego oprogramowania liczącego analizę MES.

SolidWorks Simulation pozwala bardzo szybko przyłożyć siły na model, odebrać mu stopnie swobody różnymi rodzajami podpór oraz dodać inne czynniki wpływające na wynik symulacji, takie jak grawitacja, ciśnienie, temperatura i inne. Pozwala to na bardzo szybkie przeanalizowanie wybranych wyników i wprowadzenie zmian. Przekłada się to na dużo lepszą jakością część lub całe złożenie. Do swoich symulacji używałem siatek wysokiej jakości, aby jak najlepiej odwzorować rzeczywistość.

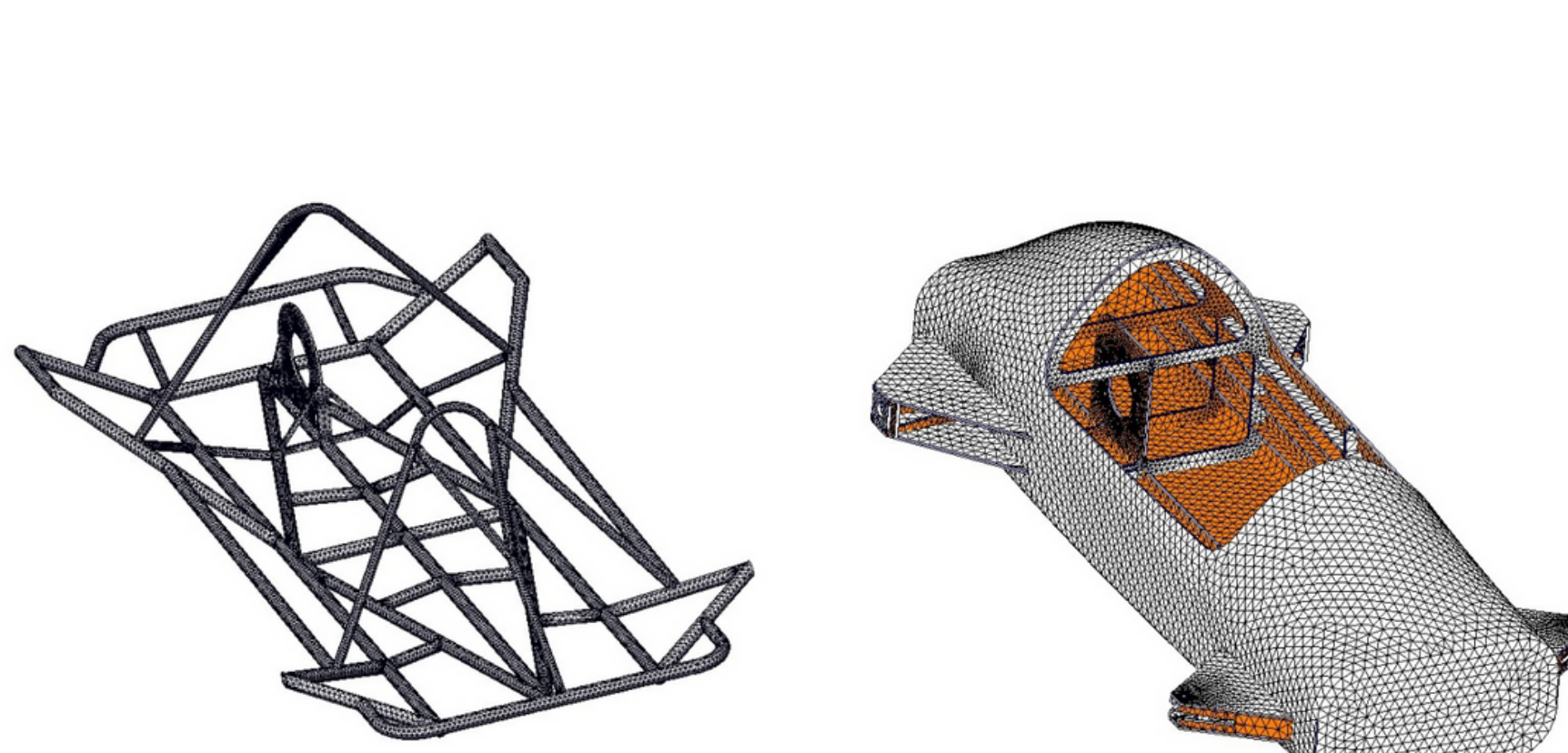
### Projekt kompozytowego monokoku

Projekt kompozytowego monokoku mojego autorstwa to konstrukcja z warstw tkanin z włókna węglowego przesączonych żywicą epoksydową oraz pianki polimetakrylimidowej. Celem tej konstrukcji jest osiągnięcie większej wytrzymałości, sztywności skrętnej oraz niższej masy w porównaniu z ramą stalową. Kompozyt przekładkowy (Sandwich) liczy wraz z przekładką 11 warstw. Kadłub oraz elementy nieprzenoszące duże naprężenia mają grubość 7 [mm].

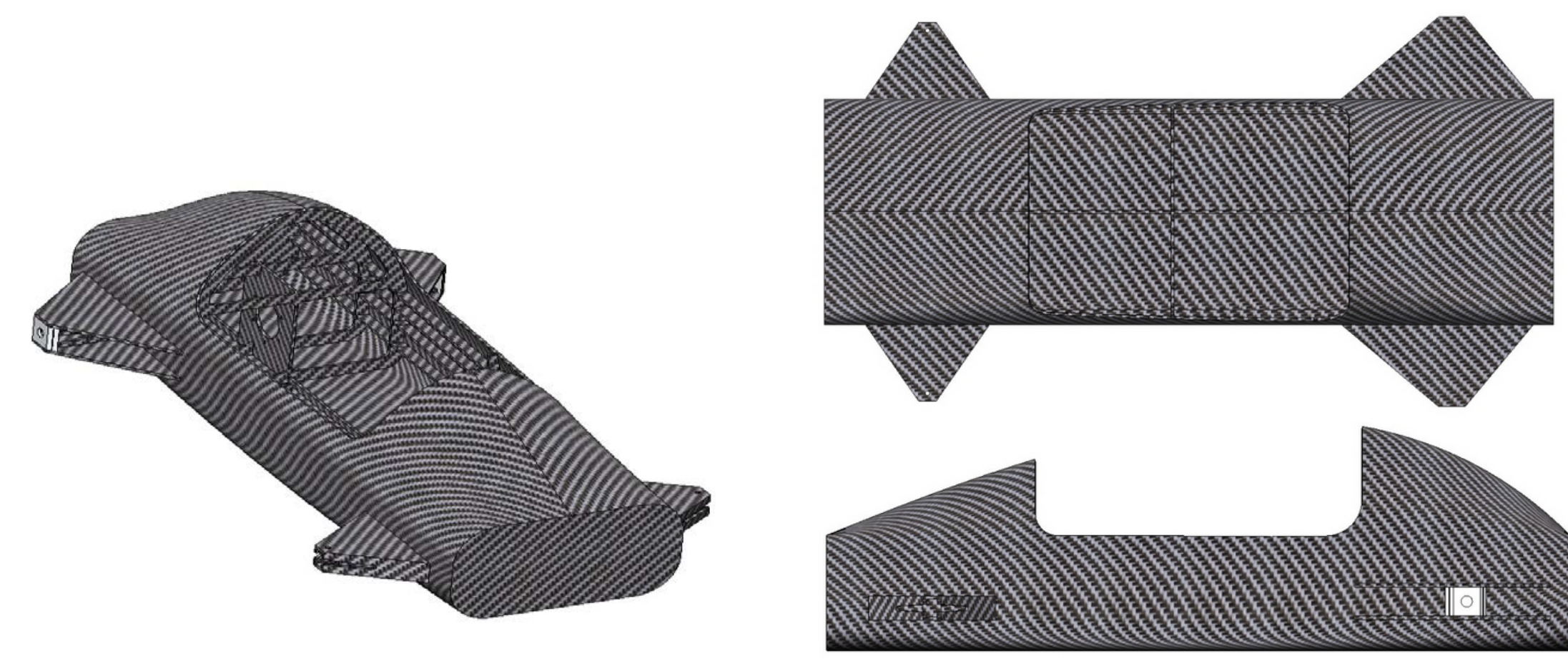
Elementy gokarta poddawane większym obciążeniom, takie jak elementy zawieszenia, wręgi i ich wzmocnienia, wykonane są z grubszej tkaniny, co w rezultacie zwiększa grubość laminatu do 7,5 [mm]. Zastosowałem kompozyt przekładkowy oraz budowę typu monokok i uzyskałem konstrukcję, która jest w wielu aspektach lepsza od tradycyjnej stalowej ramy. O9Dodatkowo na końcu wahaczy zastosowałem nie kompozytowe, ale aluminiowe mocowanie zwrotnicy. Ma to na celu umożliwienie osadzenia łożysk osi napędowej kół tylnych.



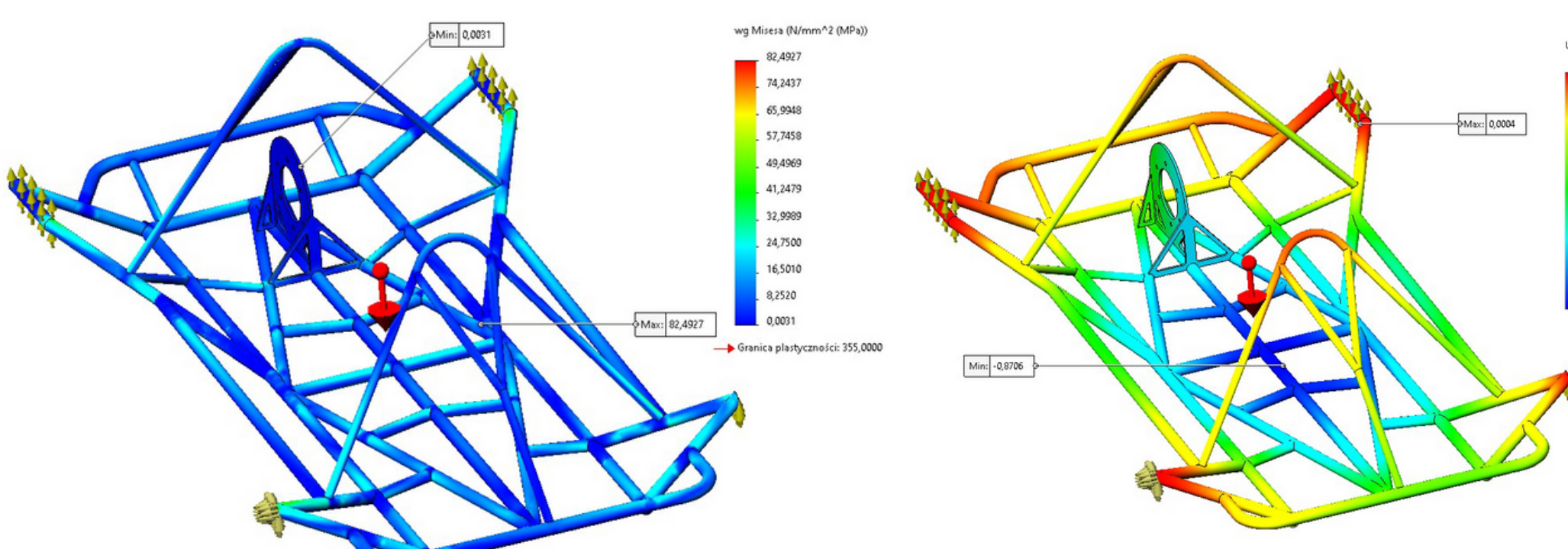
Rysunek 1. Projekt stalowej ramy



Rysunek 2. Siatka elementów skończonych modeli konstrukcji gokarta



Rysunek 3. Projekt kompozytowego monokoku

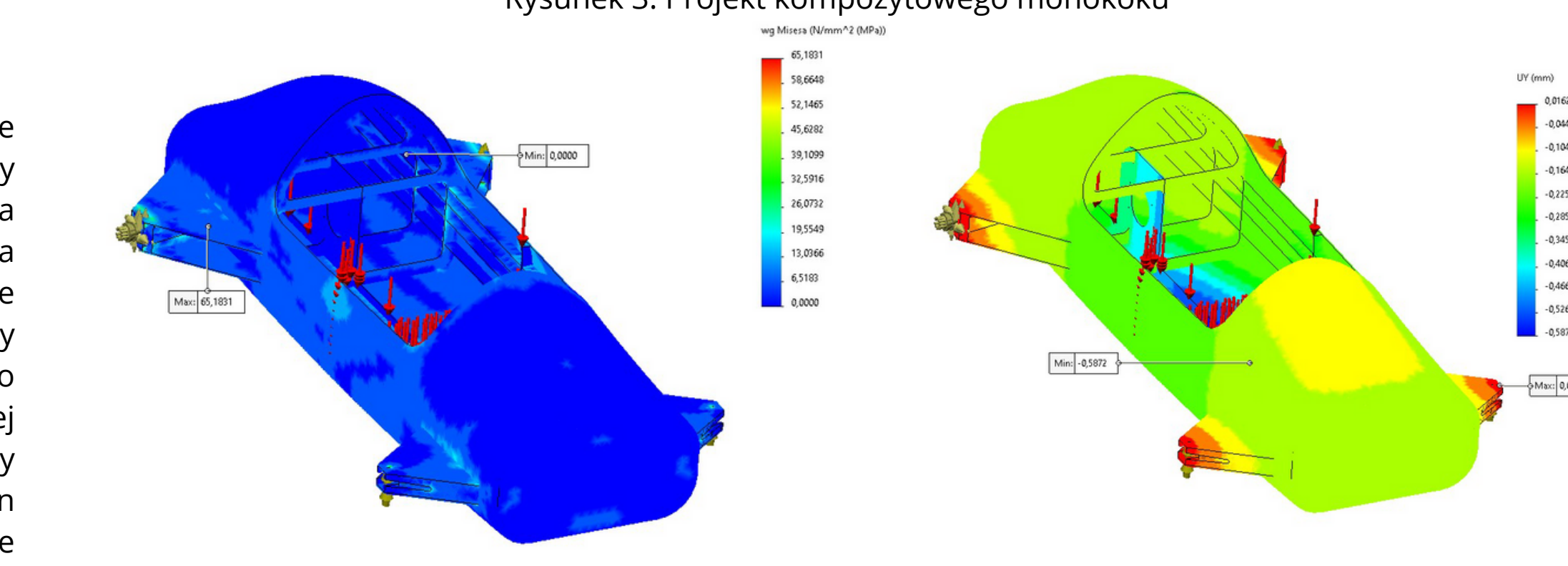


Rysunek 4. Naprężenia zredukowane oraz przemieszczenia wypadkowe w stalowej ramie gokarta

Rodzaj Badania	Analizowany parametr	Konstrukcja: Rama	Jednostka
Obciążenie równomierne rozłożoną masą	Naprężenia	82,5	[MPa]
	Przemieszczenia	0,87	[mm]
	Odształcenia	$2,24 \cdot 10^{-4}$	[-]

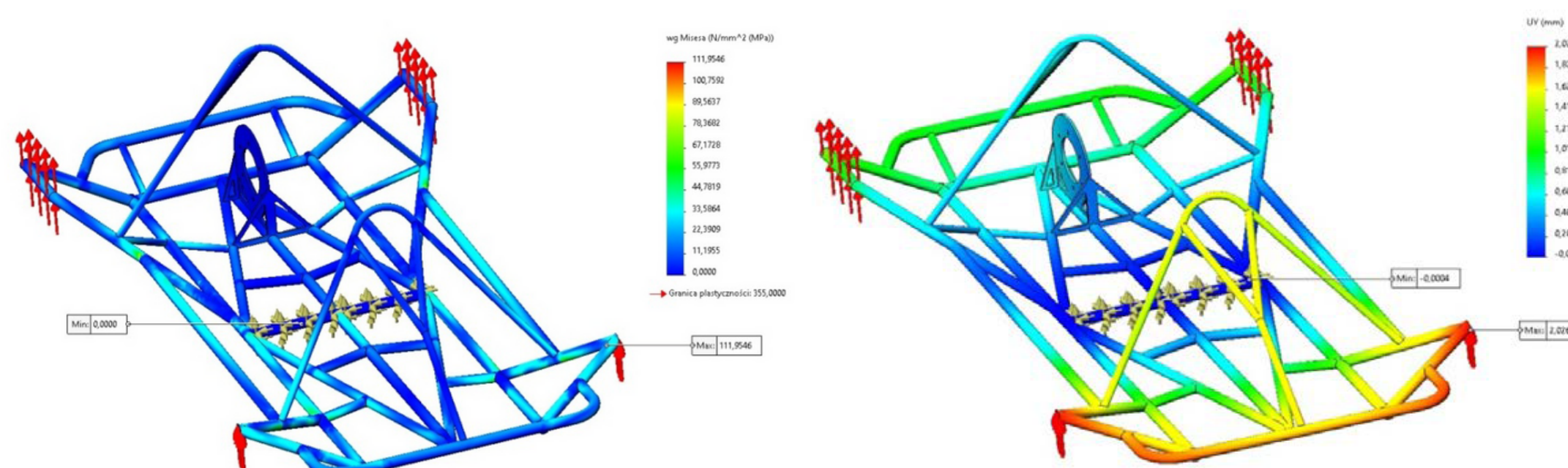
### Obciążenie centralnej części gokarta rozproszoną masą 140 [kg]

Rama została obciążona równomiernie rozproszoną masą wynoszącą 140 [kg]. Stalowe rury zostały zamodelowane ze stali S355. Na potrzeby symulacji materiał jest ciągliwy izotropowy, jednorodny oraz liniowo sprężysty. Rury, do których została przyłożona określona masa, znajdują się wewnątrz pojazdu w przestrzeni kierowcy. Rama unieruchomiona jest w czterech miejscach. Pierwsza podpora odbiera przemieszczenia we wszystkich osiach trójwymiarowego układu współrzędnych (x, y, z), znajduje się ona przy prawym przednim kole, ta podpora nie przenosi momentów sił. Następne trzy podpory to podpory przesuwne w osi poziomej, odbierają jedynie możliwość ruchu w osi pionowej oraz nie przenoszą momentów sił. Taki rodzaj podparcia jest kluczowy, gdyż należy uwzględnić to, że rzeczywisty pojazd będzie podparty na kołach z elastyczną oponą. Ten fakt jest o tyle istotny, że rzeczywista rama gokarta podczas takiego obciążenia zostanie ugięta, co w konsekwencji doprowadzi do poślizgu opony z nawierzchnią i rozsunięcia się kół. To badanie ma na celu ustalić dopuszczalną masę kierowcy oraz niezbędnych podzespołów. Sprawdziłem naprężenia zredukowane według hipotezy Hubera-Misesa-Henckego, przemieszczenia wzdłuż osi pionowej oraz odształcenia elementów konstrukcyjnych. Warunki symulacji naprężeń przemieszczeń i odształceń dla ramy stalowej były jednakowe.



Rysunek 5. Naprężenia zredukowane oraz przemieszczenia wypadkowe w kompozytowym monokoku gokarta

Rodzaj Badania	Analizowany parametr	Konstrukcja: Monokok	Jednostka
Obciążenie równomierne rozłożoną masą	Naprężenia	65,2	[MPa]
	Przemieszczenia	0,59	[mm]
	Odształcenia	$7,26 \cdot 10^{-4}$	[-]

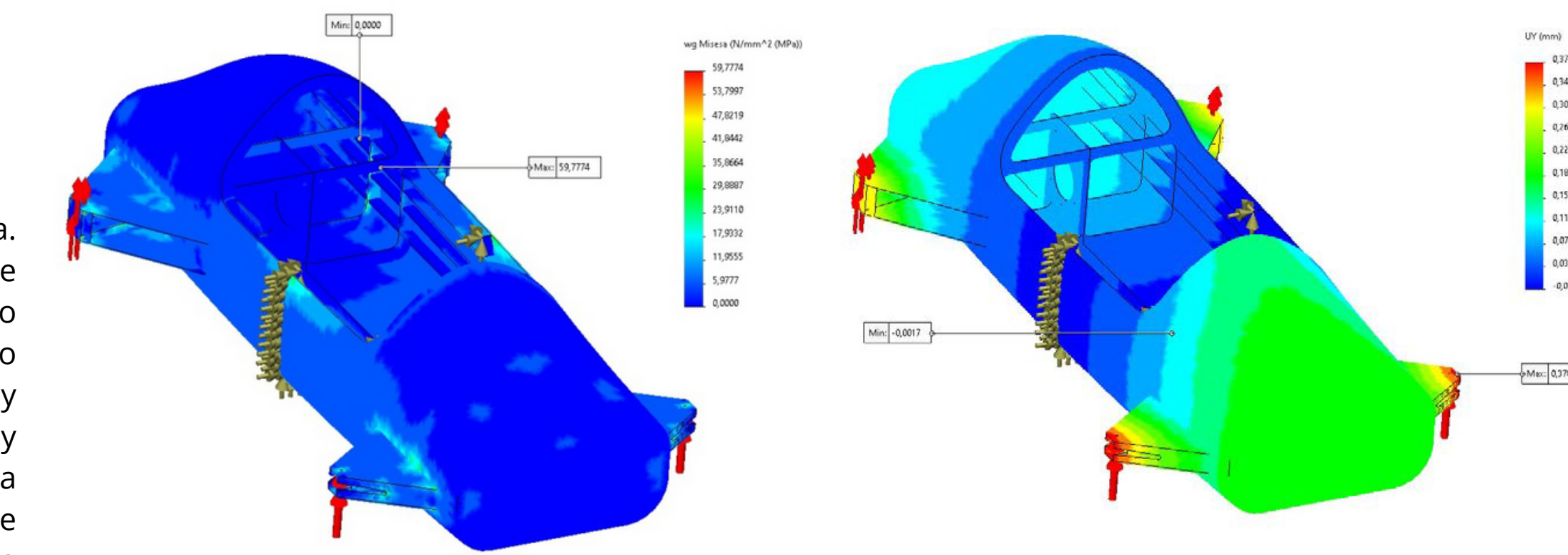


Rysunek 6. Naprężenia zredukowane oraz przemieszczenia wypadkowe w stalowej ramie gokarta

Rodzaj Badania	Analizowany parametr	Konstrukcja: Rama	Jednostka
Obciążenia podczas hamowania	Naprężenia	111,9	[MPa]
	Przemieszczenia	2,03	[mm]
	Odształcenia	$2,96 \cdot 10^{-4}$	[-]

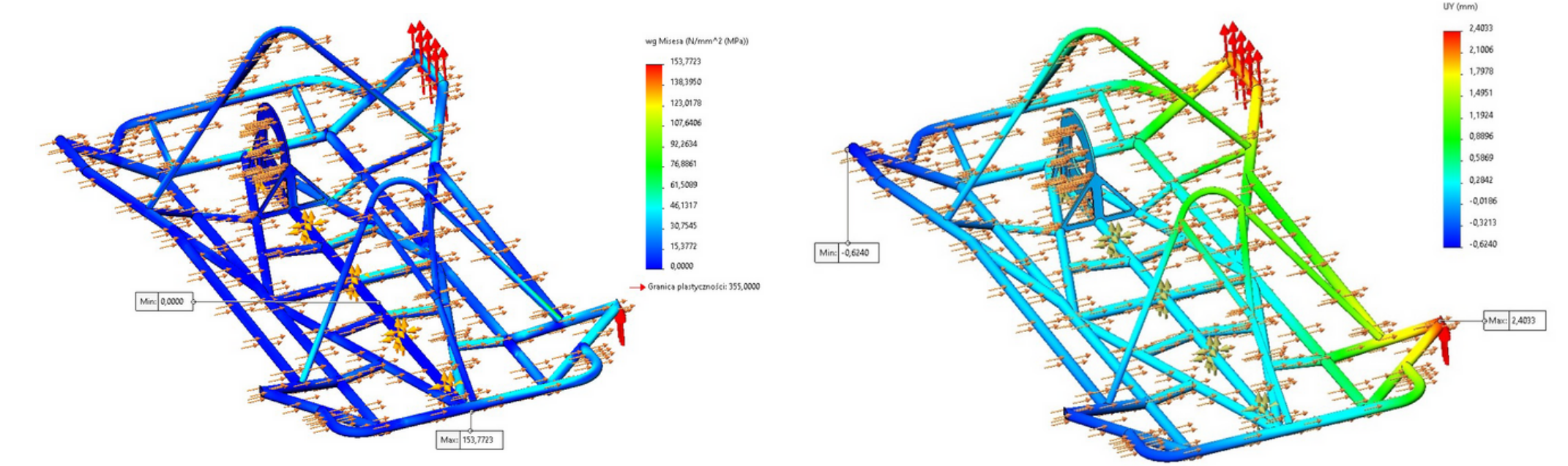
### Obciążenia podczas hamowania

To badanie ma odwzorować sytuację na torze, kiedy wykonujemy manewr hamowania. Wtedy to, zgodnie z drugą zasadą dynamiki Newtona, większa siła reakcji będzie oddziaływać na przednią oś pojazdu, a mniejsza na tylną. Wobec tego niezbędne było obliczenie tych sił. Wykorzystałem do tego zależności z książki L. Prochowskiego Po wykonaniu obliczeń otrzymałem następujące wyniki: siła działająca na przednią oś ramy stalowej 975,25 [N], a na oś tylną, wartość siły jest równa 643,38 [N]. Rama na potrzeby symulacji jest zamocowana w połowie odległości między osiami (w okolicach środka ciężkości na osi x). Podpory odbierają tylko możliwość przenoszenia przemieszczeń we wszystkich osiach (x y z), ale nie odbierają momentów. Sił reakcji działających na oś przednią, natomiast na oś tylną siła jest mniejsza i wynosi 672,05[N].



Rysunek 7. Naprężenia zredukowane oraz przemieszczenia wypadkowe w kompozytowym monokoku gokarta

Rodzaj Badania	Analizowany parametr	Konstrukcja: Monokok	Jednostka
Obciążenia podczas hamowania	Naprężenia	59,8	[MPa]
	Przemieszczenia	0,38	[mm]
	Odształcenia	$3,89 \cdot 10^{-4}$	[-]

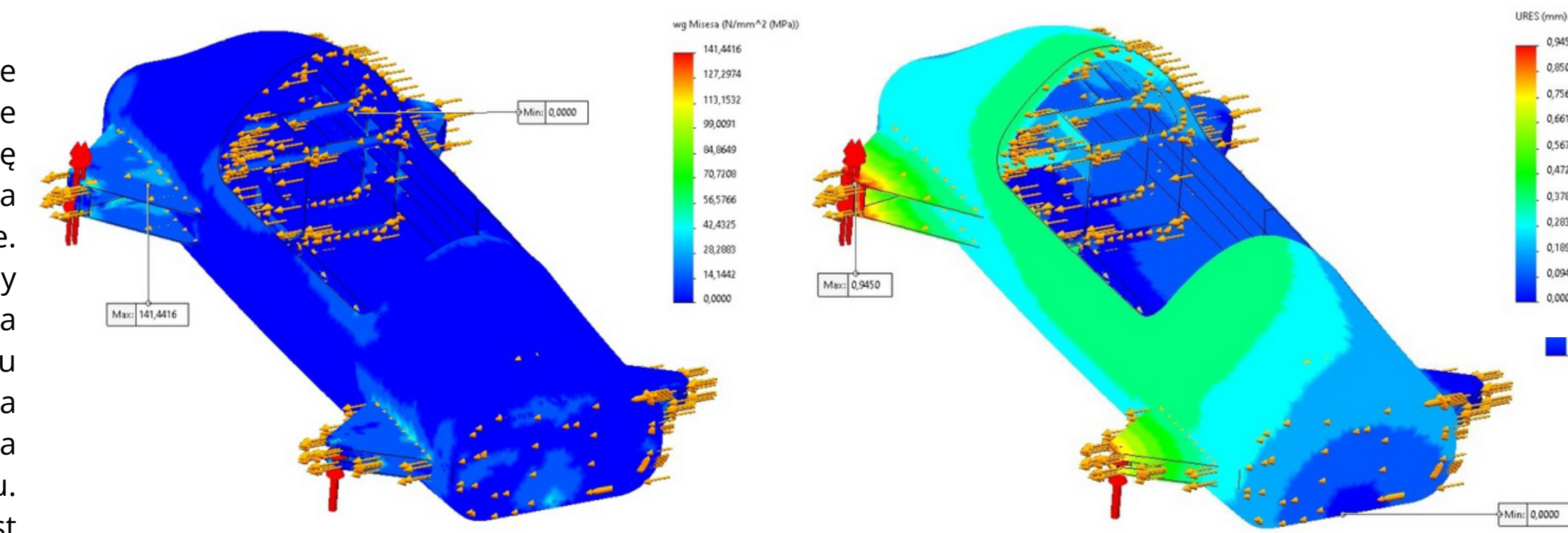


Rysunek 8. Naprężenia zredukowane oraz przemieszczenia wypadkowe w stalowej ramie gokarta

Rodzaj Badania	Analizowany parametr	Konstrukcja: Rama	Jednostka
Obciążenia podczas pokonywania zakrętu	Naprężenia	153,77	[MPa]
	Przemieszczenia	2,52	[mm]
	Odształcenia	$4,79 \cdot 10^{-4}$	[-]

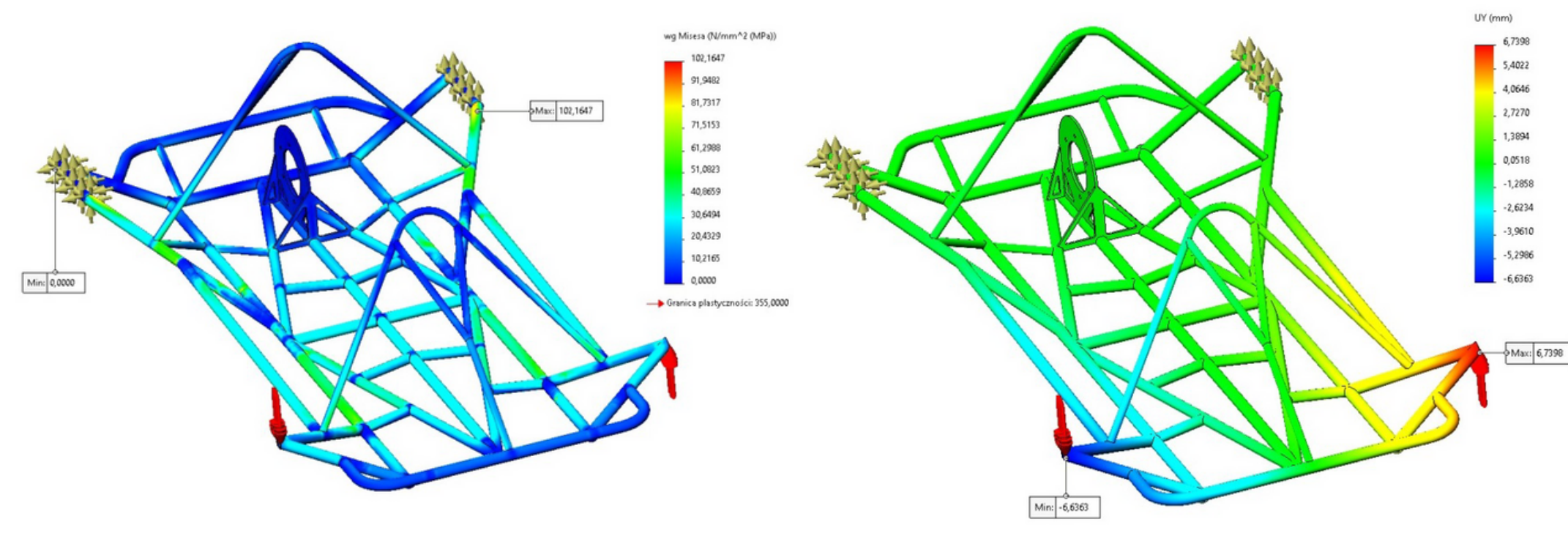
### Obciążenia podczas pokonywania zakrętu

To badanie pozwala na sprawdzenie, jak zachowuje się rama w trakcie jazdy na zakręcie o małym promieniu. Przejazd z dużą prędkością po zakręcie o małym promieniu, może spowodować przewrócenie pojazdu przez siłę odśrodkową. To badanie sprawdza tę fazę ruchu, kiedy na pojazd działa siła odśrodkowa na zakręcie o promieniu 3 [m]. Ta siła odśrodkowa próbuje przewrócić pojazd i powoduje większy nacisk na koła zewnętrzne. W tym badaniu sprawdzałem, jak zachowa się rama na granicy przewrócenia, wtedy gdy cała masa jest rozłożona tylko na dwa zewnętrzne koła. Siła odśrodkowa działająca na pojazd oraz wartość sił reakcji zostały obliczone z zależności na podstawie Mechaniki ruchu Leona Prochowskiego. [30] Parametry symulacji są następujące: podpora odbierająca przemieszczenia we wszystkich osiach układu współrzędnego, ale nieodbierająca momentów sił. Podparcie realizowane jest za środkową belką wzdłuż osi symetrii pojazdu. Wartość siły odśrodkowej działająca na całą ramę pojazdu wynosi 2385,74 [N] i jest skierowana poziomo pod kątem prostym do sił reakcji działających na zewnętrzne koła gokarta. Podparcie realizowane jest za środkową podłużnicą, wzdłuż osi symetrii pojazdu. Wartość siły odśrodkowej działającej na cały pojazd wynosi 2464,0146 [N] i jest skierowana poziomo, pod kątem prostym, do sił reakcji działających na zewnętrzne koła gokarta.



Rysunek 9. Naprężenia zredukowane oraz przemieszczenia wypadkowe w kompozytowym monokoku gokarta

Rodzaj Badania	Analizowany parametr	Konstrukcja: Monokok	Jednostka
Obciążenia podczas pokonywania zakrętu	Naprężenia	141,44	[MPa]
	Przemieszczenia	0,95	[mm]
	Odształcenia	$7,18 \cdot 10^{-4}$	[-]



Rysunek 10. Naprężenia zredukowane oraz przemieszczenia wypadkowe w stalowej ramie gokarta

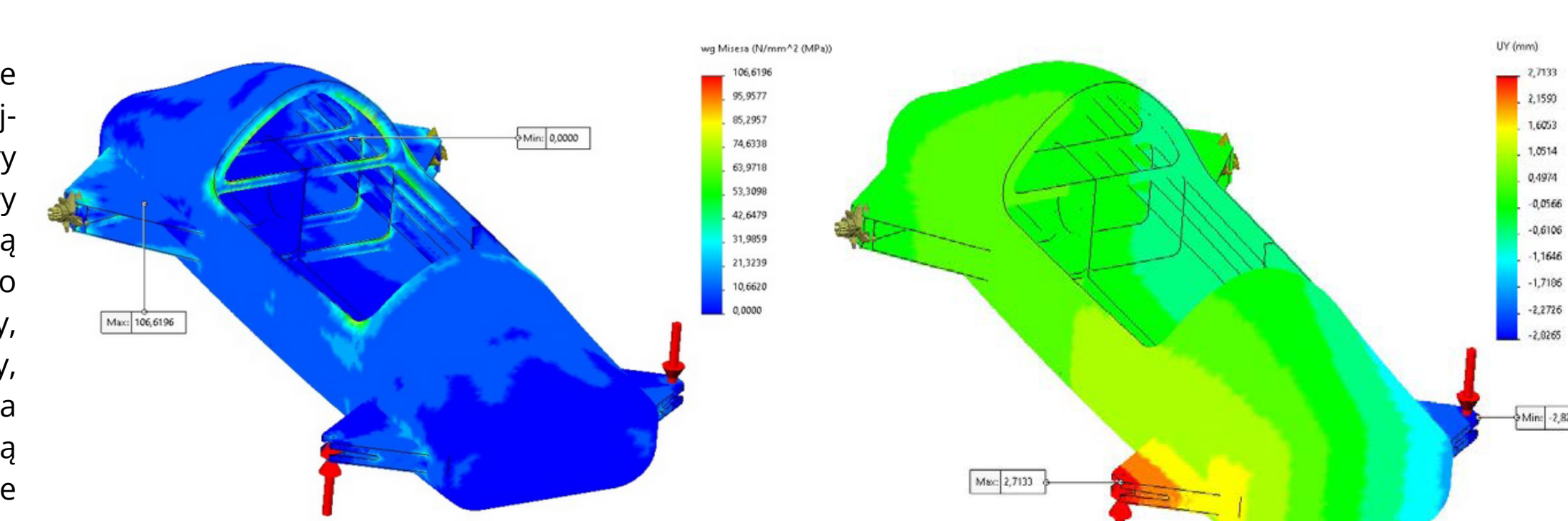
Rodzaj Badania	Analizowany parametr	Konstrukcja: Rama	Jednostka
Sztwności skrętnej	Naprężenia	102,2	[MPa]
	Przemieszczenia	6,74	[mm]
	Odształcenia	$3,48 \cdot 10^{-4}$	[-]
	Kąt skręcenia	0,91	[°]
	Sztwność skrętna	210	[Nm/°]

### Badanie sztywności skrętnej gokarta

Badanie sztywności skrętnej jest kluczowym badaniem, przez które przechodzą ramy i inne rozwiązania konstrukcyjne nośne pojazdów. Badanie to polega na tym, że z tyłu w miejscach mocowania zwrotnicy kół tylnych mocujemy pojazd. Użyłem do tego jednej podpory nieprzesuwnej odbierającej przemieszczenia we wszystkich osiach oraz jednej podpory przesuwnej odbierającej przemieszczenia wzdłuż osi pionowej. Obie podpory nie przenoszą momentów sił. Natomiast siły, które będą generować moment skręcający, przykładam do miejsca mocowania tylnych kół. Wartość przyłożonej siły to 450 [N]. Przyłożone są dwie siły, obie w kierunku pionowym, ale o przeciwnych zwrotach, aby zamodelować skręcanie ramy, tak by oś obrotu znalazła się w osi ramy. Przy rozstawie kół wynoszącym 0,85 [m] można obliczyć moment, który wynosi 191,25 [Nm] i działa na ramieniu 0,425 [m]. Analizie będą podlegały przemieszczenia, ponieważ z nich będzie obliczany kąt ugięcia ramy, a następnie sztywność skrętna ramy w [Nm/°]. Badanie to pozwala zbadać, jak zachowa się rama, kiedy koła zostaną nierówno obciążone, na przykład podczas najechania tylko jednym kołem na wystającą przeszkodę, co w konsekwencji spowoduje skręcenie tej ramy wokół własnej osi.

### Podsumowanie

Analiza porównawcza wyników pozwoliła udowodnić, że konstrukcja typu monokok jest wytrzymałsza i sztywniejsza w porównaniu do ramy stalowej. Mimo trudniejszego i kosztowniejszego procesu produkcji cechuje się także niższą masą. W badaniach wykazano, że gokart elektryczny, w którym nadwozie będzie monokokiem, odznaczy się lepszymi osiągnięciami oraz docelowo poprawą kierowności i sterowności na torze kartingowym.



Rysunek 11. Naprężenia zredukowane oraz przemieszczenia wypadkowe w kompozytowym monokoku gokarta

Rodzaj Badania	Analizowany parametr	Konstrukcja: Monokok	Jednostka
Sztwności skrętnej	Naprężenia	106,61	[MPa]
	Przemieszczenia	2,71	[mm]
	Odształcenia	$5,23 \cdot 10^{-4}$	[-]
	Kąt skręcenia	0,36	[°]
	Sztwność skrętna	523	[Nm/°]