

Opracowanie oraz badanie systemów tłumiących energię uderzenia w hełmach balistycznych

Kamila Wiśniewska¹, Monika Ratajczak¹, Tomasz Klekiel¹

¹Katedra Inżynierii Biomedycznej, Instytut Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej, Wydział Mechaniczny, Uniwersytet Zielonogórski, ul. Prof. Szafrana 4, 65-516 Zielona Góra

Spis treści

1. Wstęp	1
2. Możliwości programu Ansys Granta EduPack.....	3
3. Praca z programem Ansys Granta EduPack w celu wyłonienia materiałów konstrukcyjnych wyściółki absorbującej.....	4
4. Wyniki i podsumowanie	10

Streszczenie

Program Ansys Granta EduPack umożliwia pracę z szeroką bazą materiałów konstrukcyjnych. Narzędzie to wspomaga pracę studentów oraz naukowców w istotnym z punktu widzenia działań inżynierskich doborze materiałów konstrukcyjnych. Program zawiera szeroką bazę materiałową, szczegółowe informacje o nich oraz wiele opcji umożliwiających precyzyjny dobór parametrów materiałowych. Zakres zastosowań Ansys Granta EduPack jest bardzo szeroki, począwszy od nauczania, badań, aż po projektowanie. Z tego też powodu zdecydowano się na skorzystanie z niego podczas realizacji pracy dotyczącej opracowania nowych systemów tłumiących energię uderzenia w hełmach balistycznych.

Celem pracy było opracowanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych na wyściółki do hełmów balistycznych. Do badań wykorzystano program Ansys Granta EduPack, w którym wyselekcjonowano najlepsze materiały absorbujące energię uderzenia. Materiały dobrano na podstawie określonych kryteriów tak, aby w połączeniu z odpowiednią geometrią wyściółki zapewniały one ochronę tkanek głowy, a przede wszystkim mózgu przed szkodliwymi skutkami działających obciążeń dynamicznych.

1. Wstęp

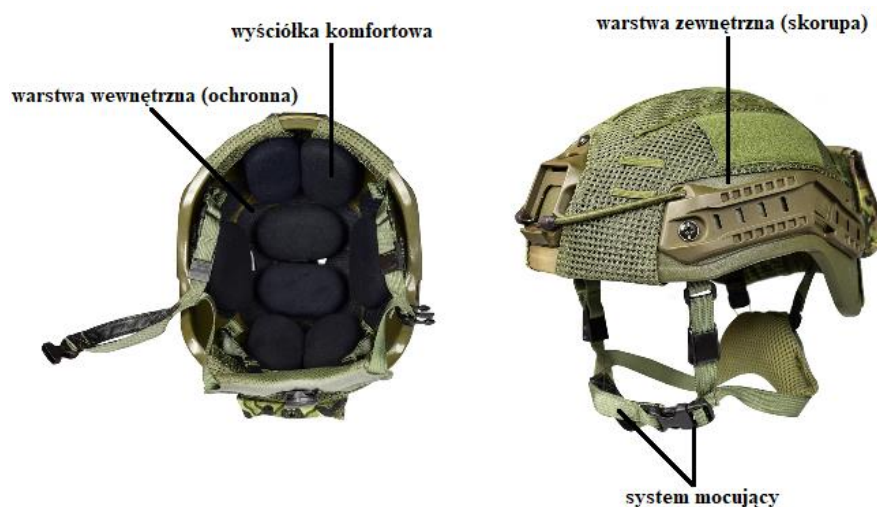
W ostatnich latach zarówno w literaturze medycznej, jak i technicznej można zaobserwować znaczące zainteresowanie środkami ochrony w kontekście urazów głowy. Urazowe uszkodzenie mózgu (UUM), jak podaje American Association of Neurological Surgeons [1], to uraz, do powstania którego dochodzić może wskutek nagłego i gwałtownego uderzenia głową w przeszkodę, jej wstrząsem lub penetracją przez inny obiekt. Do skutków UUM należą m. in. zmiana stanu psychicznego i świadomości, długotrwała utrata przytomności, śpiączka, a nawet śmierć [12, 13, 14].

Do urazów tych dochodzić może podczas codziennych czynności takich, jak np. uprawianie wszelkiego rodzaju sportów (rolkarstwo, kolarstwo, football amerykański, sporty ekstremalne itd.), upadków z wysokości, wypadków komunikacyjnych, czy też działań bojowych [2, 12, 13]. Badania

przeprowadzone przez Theeler i współ. [3] wykazały, że 15 do 20 % weteranów wojennych powracających z Afganistanu i Iraku cierpi z powodu przebytych urazów głowy [3]. W dobie nowoczesnych technologii możliwe jest tworzenie struktur chroniących głowę o coraz to skuteczniejszych właściwościach ochronnych. Z uwagi na fakt, że urazy głowy stanowią poważny problem zdrowotny, ograniczając normalne funkcjonowanie w społeczeństwie istnieje silna potrzeba szukania nowych rozwiązań tłumiących energię uderzenia.

Do najczęściej występujących urazów, ze względu na mechanizm ich powstawania, zalicza się te powstałe w wyniku uderzenia głową w twardą przeszkodę. Takie urazy należą do grupy uszkodzeń dynamicznych kontaktowych. Podczas takiego zderzenia powstają wstrząsy, będące skutkiem sił bezwładności generowanych podczas przyspieszenia lub gwałtownego zwalniania. Siły te mogą być liniowe lub obrotowe. Gwałtowne przyspieszenie, opóźnienie lub siły rotacyjne powodują wydłużenie i deformację mózgu, rozciąganie poszczególnych komórek, naczyń krwionośnych, a także zmianę przepuszczalności błony komórkowej [2, 4, 18].

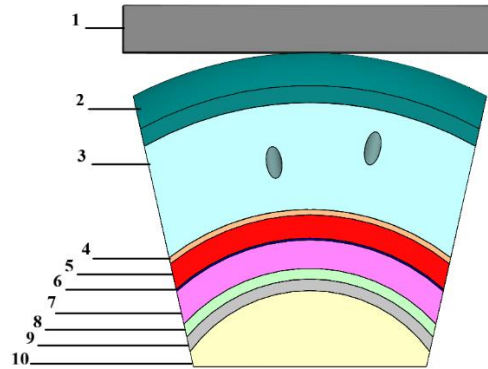
Hełm balistyczny (rys. 1) służy głównie do ochrony głowy i twarzy. Składa się on z dwóch głównych części: warstwy zewnętrznej (skorupy) i warstwy wewnętrznej (wykładziny ochronnej). Dodatkowymi elementami hełmu są wyściółka komfortowa i układ mocujący. Noszenie hełmu jest najskuteczniejszym sposobem na ograniczenie obrażeń głowy i ryzyka śmierci osób ulegającym wypadkom. Badania statystyczne pokazują, że używanie odpowiedniego hełmu podczas kolizji może zredukować obrażenia głowy o 70% - 88%, a obrażenia twarzy o niemalże 65% [5, 18].



Rys. 1. Schemat budowy hełmu; opracowanie własne na podstawie [6, 7, 8].

Celem pracy było zbadanie wybranych struktur i materiałów wyściółki absorbującej energię dla hełmu wojskowego. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES) w programie ANSYS. MES jest aktualnie jedną z najlepszych metod badań odpowiedzi biomechanicznej tkanek ludzkich i zwierzęcych [16, 17]. W ramach pracy opracowano modele numeryczne hełmu w ujęciu globalnym i lokalnym. Szczegółowe analizy przeprowadzono na modelach lokalnych. Fragmenty hełmu składały się z 10 przylegających do siebie warstw. Analizowano różne konfiguracje geometryczne warstwy absorbującej. Konstrukcja ta złożona była z elementów hełmu, głowy oraz nieruchomej przeszkody, w którą podczas symulacji uderzają pozostałe części modelu. Model obliczeniowy przyjęto jako układ warstwowy, przy czym dla modelu

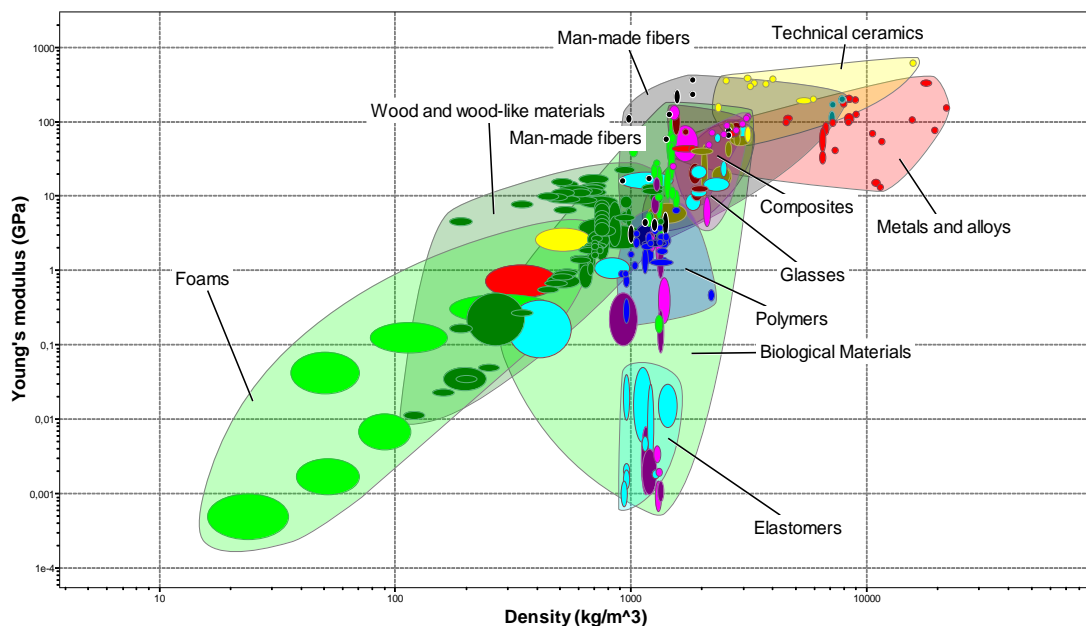
głowy przyjęto następujące warstwy: skóra, czaszka, opona mózgową twarda i miękka, płyn mózgowo-rdzeniowy, istota biała i szara. W modelu hełmu wyróżniono skorupę oraz wyściółkę absorbującą energię uderzenia. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy widok modelu hełmu z absorberem z geometrią walcowatych otworów wraz z oznaczeniami poszczególnych warstw.



Rys. 2. Widok modelu, gdzie warstwy zostały oznaczone następująco: 1 – przeszkoda, 2 – skorupa, 3 – absorber, 4 – skóra, 5 – czaszka, 6 – opona mózgową miękka, 7 – opona mózgową twarda, 8 –płyn mózgowo-rdzeniowy, 9 – istota szara, 10 – istota biała.

2. Możliwości programu Ansys Granta EduPack

Ansys Granta EduPack zawiera bazę danych materiałów, a także informację o nich, narzędzia do doboru materiałów oraz szereg zasobów pomocniczych. Program ten jest szczególnie pomocny przy projektowaniu inżynierskim w którym istotne znaczenie odgrywają własności materiałów konstrukcyjnych. Na rysunku 3 przedstawiono ogólny wykres dla wszystkich pozycji bazy materiałów w odniesieniu do takich kryteriów jak moduł Younga i gęstość.



Rys. 3. Ogólny wykres wszystkich materiałów, Ansys Granta EduPack 2021 [11].

Program zapewnia interaktywne projekcje i wykresy, co znacznie upraszcza i przyspiesza analizę oraz wybór. Środowisko EduPack dzieli się na trzy poziomy. Umożliwia to dostęp do odpowiedniego poziomu informacji oraz mniejszej lub większej ilości materiałów w zależności od pożądanej szczegółowości przy doborze materiału oraz stopnia zaawansowania wykonywanych prac. Począwszy od poziomu 1. - Limit Stage, zawierającego 264 materiały, ilość dostępnych materiałów wzrasta [9]. Na rysunku 3 przedstawiono standardowy wykres materiałów generowany przez program.

3. Praca z programem Ansys Granta EduPack w celu wyłonienia materiałów konstrukcyjnych wyściółki absorbującej

W celu wyłonienia najlepszych absorberów energii z zastosowaniem do hełmów balistycznych przyjęto następujące kryteria materiałowe:

1. gęstość,
2. moduł Younga,
3. wytrzymałość na ściskanie,
4. wytrzymałość na rozciąganie,
5. wytrzymałość na kruche pękanie,
6. cena.

Kolejność kryteriów jest istotna ze względu na ich masę, zaczynając od kryterium najważniejszego, czyli gęstości. Na ich podstawie przy użyciu programu Ansys Granta EduPack 2021 utworzone zostały wykresy Ashby'ego. Wykresy te do szczegółowej analizy, służącej wyłonieniu materiałów spełniających przyjęte kryteria.

I. Kryterium nr 1 – zależność wytrzymałości od gęstości

Najważniejszym kryterium charakteryzującym hełm jest jego masa. Ma ona zasadniczy wpływ na korzystanie z hełmu, wpływając m.in. na komfort użytkowania. W celu jej wyznaczenia wykorzystana została gęstość użytego materiału. Gęstość ta powinna zawierać się w granicach 100 – 1200 kg/m³ [7, 10]. Moduł Younga jest parametrem ważnym przy dalszej ocenie takich parametrów, jak wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie oraz podatność na odkształcenia sprężyste i plastyczne. Wartość jego powinna zawierać się w zakresie 0,1 – 1000 MPa [7, 10]. Zależność ta jest ważna ze względu na to, że wyściółka powinna być wytrzymała na wszelkiego rodzaju uderzenia, a zarazem lekka, aby nie powodować dyskomfortu podczas używania hełmu.

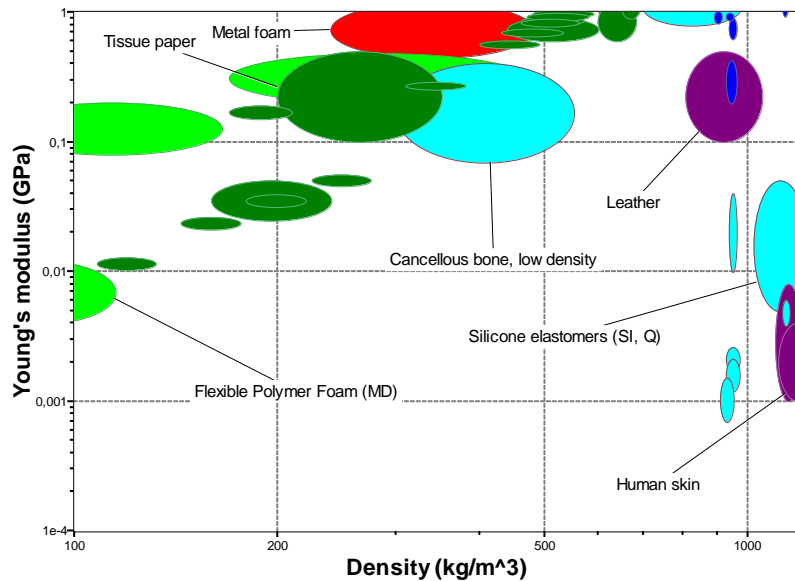
Zależności:

Oś x – gęstość, oś y – Moduł Younga.

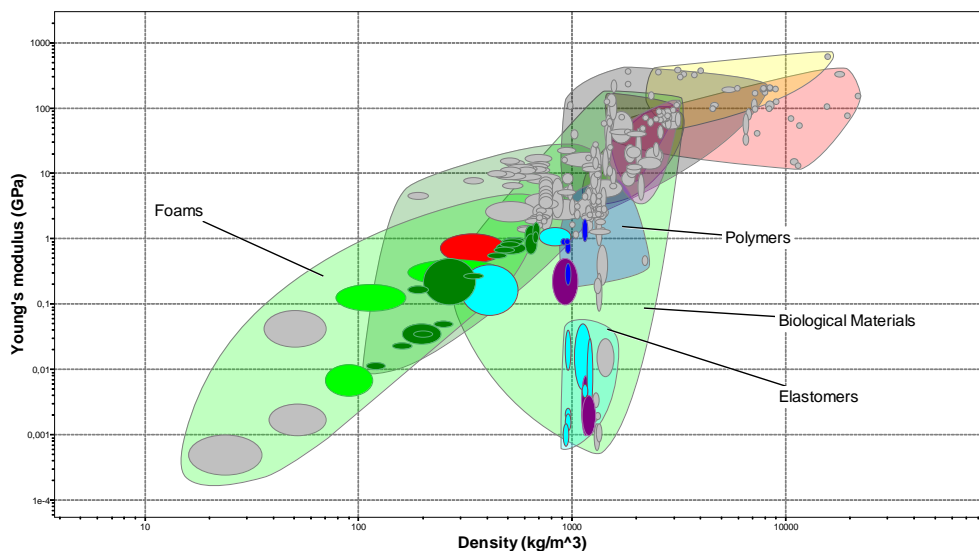
Wartości:

- Moduł Younga – 0,1 – 1000 MPa,
- Gęstość - 100 – 1200 kg/m³.

Na rysunku 4 widoczny jest wykres nr 1 (wytrzymałość od gęstości), na którym przedstawione zostały materiały wyłonione na podstawie wartości zadanych parametrów – modułu Younga i gęstości. Z grupy 264 materiałów z modułu Limit Stage programu Ansys Granta EduPack wyłonione zostało 40 materiałów. Są to m.in. sztywna pianka polimerowa, korek i EVA. Na rysunku 5 przedstawiony został ten sam wykres, ale z określeniem grup, do których przynależą te materiały.



Rys. 4. Wykres Ashby'ego zależności modułu Younga od gęstości, Ansys Granta EduPack 2021 [11].



Rys. 5. Wykres Ashby'ego zależności modułu Younga od gęstości z określeniem grup, do których należą wyłonione materiały, Ansys Granta EduPack 2021 [11].

II. Kryterium nr 2 – Zależność wytrzymałości na ściskanie od gęstości

Materiał absorbera powinien być podatny na odkształcenia powstające w wyniku ściskania, aby mógł pełnić swoją funkcję energochłonną. Zakłada się, że absorpcja dużej energii odbywa się kosztem niszczenia absorbera wskutek dynamicznego obciążenia. Materiał ten nie powinien ulegać niszczeniu podczas zwykłego użytkowania oraz umożliwiać absorpcję energii powyżej 1600 J [15]. W wyniku tych założeń wybór materiału powinien ograniczać się do materiałów o średniej sztywności, charakteryzujących się wysoką wytrzymałością na ściskanie, co spowodowało że zakres granicznej wytrzymałości na ściskanie przyjęto jako 1 – 1000 MPa [7].

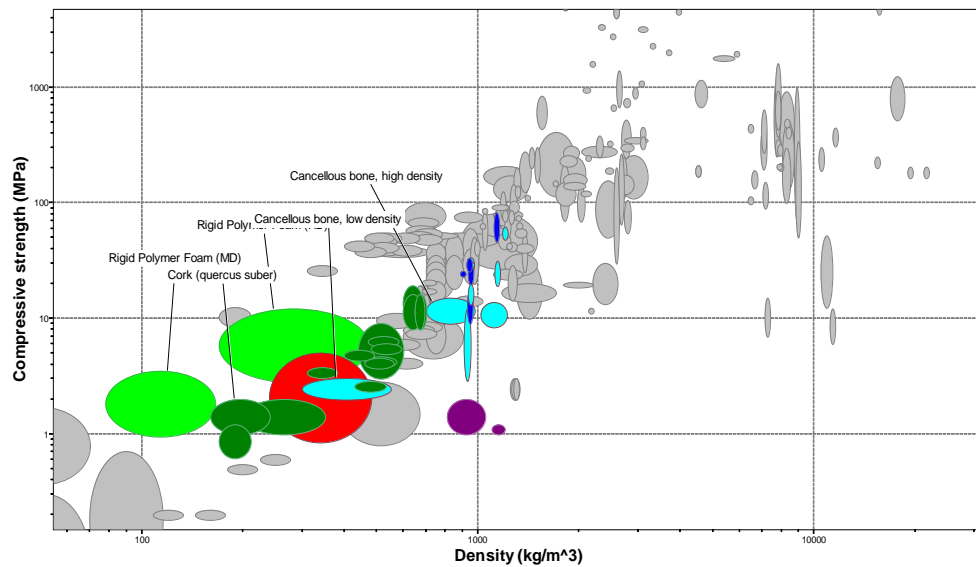
Zależności:

Oś x – gęstość, oś y – wytrzymałość na ściskanie.

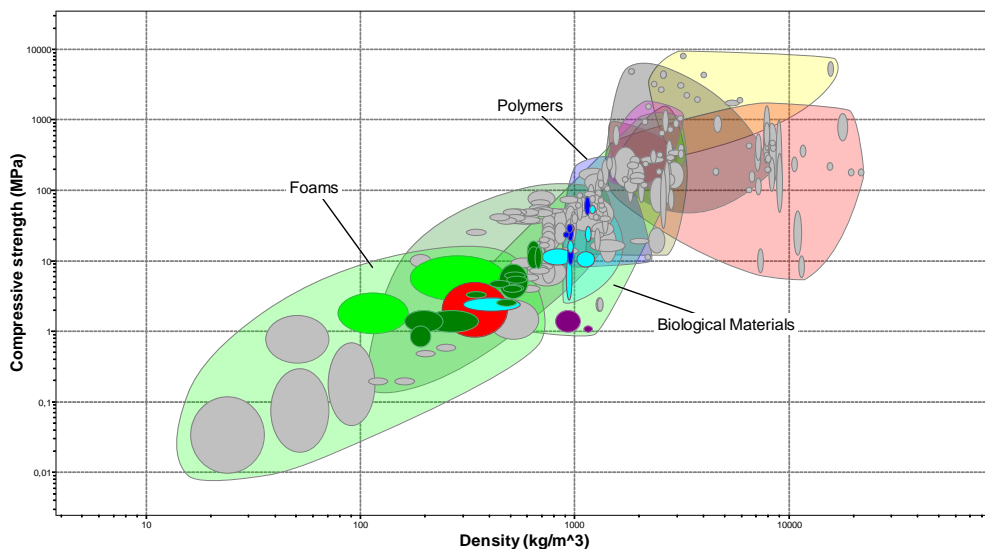
Wartości:

- wytrzymałość na ściskanie – 1 – 1000 MPa,
- gęstość - 100 – 1200 kg/m³.

Wykres na rys. 6 przedstawia materiały wyłonione na podstawie wartości zadanych parametrów – wytrzymałość na ściskanie i gęstości. Z grupy 40 (wyodrębnionych na podstawie poprzednich parametrów) materiałów z modułu Limit Stage programu Ansys Granta EduPack wyłoniono 34 materiały. Materiały te to m. in. skóra, polietylen, sztywna pianka polimerowa, kauczuk naturalny, korek i EVA. Ten sam wykres, ale z określeniem grup, do których przynależą te materiały przedstawiony został na rysunku 7.



Rys. 6. Wykres Ashby'ego zależności wytrzymałości na ściskanie od gęstości, Ansys Granta EduPack 2021 [11].



Rys. 7. Wykres Ashby'ego zależności wytrzymałości na ściskanie od gęstości z określeniem grup, do których należą wyłonione materiały, Ansys Granta EduPack 2021 [11].

III. Kryterium nr 3 – Zależność wytrzymałości na rozciąganie od gęstości

Z uwagi na przeznaczenie, materiał wyściółki energochłonnej narażony jest na znaczne odkształcenia spowodowane uderzeniem, dlatego też zakres wytrzymałości na rozciąganie powinien mieścić się w granicach 0,1 – 100 MPa [7].

Zależności:

Oś x – gęstość, oś y – wytrzymałość na ściskanie.

Wartości:

- wytrzymałość na rozciąganie – 0,1 – 100 MPa,
- gęstość - 100 – 1200 kg/m³.

Z grupy 34 (wyodrębnionych na podstawie poprzednich parametrów) materiałów z modułu Limit Stage programu Ansys Granta EduPack wyłonione zostały 34 materiały, zatem wykres pozostaje bez zmian i przedstawia się tak samo, jak w przypadku wytrzymałości na ściskanie od gęstości. Są to m. in. skóra, polietylen, sztywna pianka polimerowa, kauczuk naturalny, korek i EVA.

IV. Wykres nr 4 - Wytrzymałość na kruche pękanie od gęstości

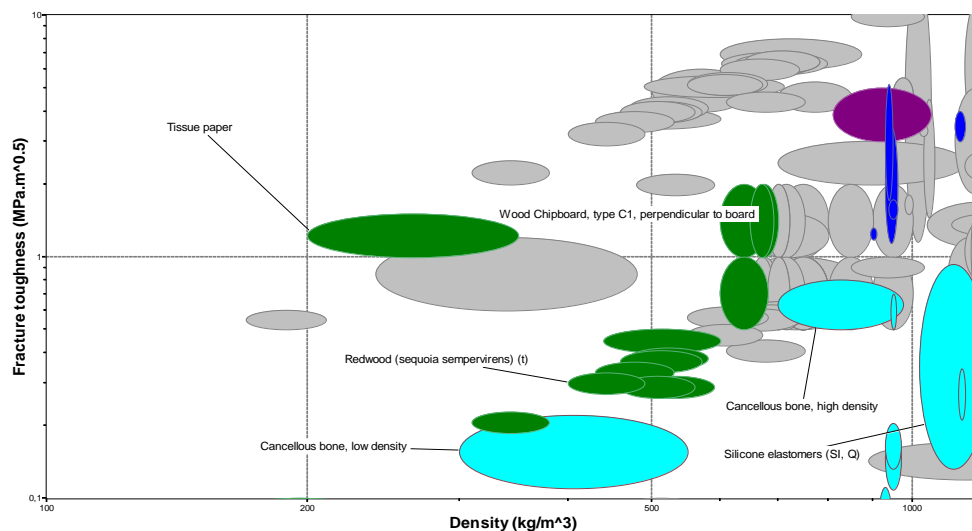
Materiał powinien odkształcać się plastycznie tak, aby podczas uderzenia nie dochodziło do jego pęknięć. Pęknięcia powodują przerwanie ciągłości struktury i zniszczenia wyściółki energochłonnej, a co za tym idzie – konieczność jej wymiany. Z tych też powodów wytrzymałość na kruche pękanie określono w zakresie 0,1 – 10 MPa.m^{1/2} [7, 10].

Zależności:

Oś x – gęstość, oś y – wytrzymałość na ściskanie.

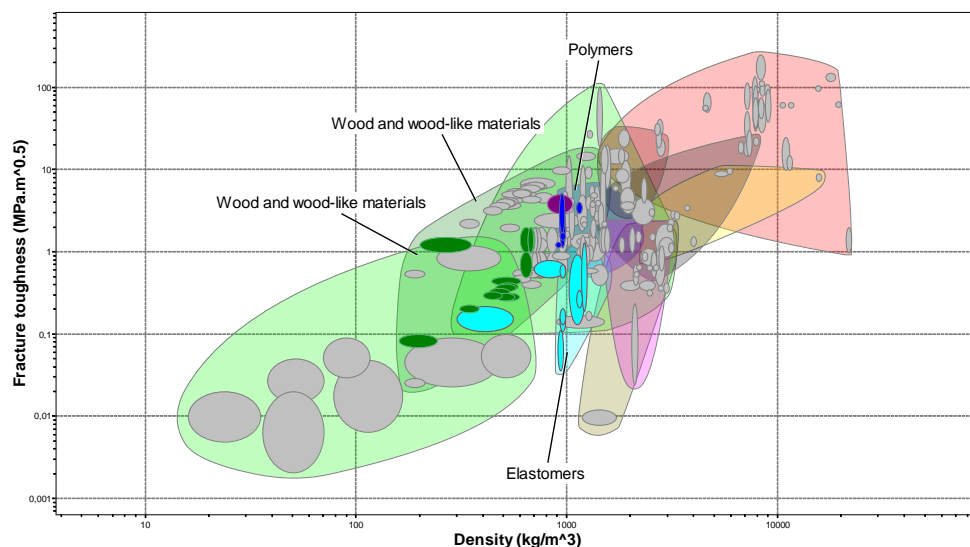
Wartości:

- wytrzymałość na kruche pękanie – 0,1 – 10 MPa.m^{1/2},
- gęstość - 100 – 1200 kg/m³.



Rys. 8. Wykres Ashby'ego zależności wytrzymałości na kruche pękanie od gęstości, Ansys Granta EduPack 2021 [11].

Z grupy 34 materiałów wyodrębnionych na podstawie poprzednich kryteriów, z modułu Limit Stage programu Ansys Granta EduPack wyłonione zostało 29 materiałów. Rysunek 8 ukazuje wykres nr 4 (wytrzymałość na kruche pękanie od gęstości), na którym przedstawiono wyłonione materiały na podstawie wartości zadanych parametrów – wytrzymałość na ściskanie i gęstości. Materiał te to m. in. skóra, polietylen, elastomer silikonowy, kauczuk naturalny, korek i EVA. Rysunek 9 przedstawia ten sam wykres, ale z określeniem grup, do których przynależą wyodrębnione materiały.



Rys. 9. Wykres Ashby'ego zależności wytrzymałości na kruche pękanie od gęstości z określeniem grup, do których należą wyłonione materiały, Ansys Granta EduPack 2021 [11].

V. Kryterium nr 5 – Zależność modułu Younga od ceny

Zarówno dla użytkowników, jak i producentów cena stanowi ważne kryterium. Im jest niższa, tym lepiej pod kątem produkcji i sprzedaży. Potencjalny kupiec, biorąc pod uwagę właściwości techniczne w tym ochronne, wytrzymałościowe itd., również sugeruje się ceną, wybierając dobrą jakość przy możliwie jak najniższej cenie. Materiał zatem powinien zapewnić jak największe bezpieczeństwo przy możliwej do zaakceptowania przez użytkownika cenie, dlatego też określono ją w granicach [7]. Zakres ceny materiału określono jako 1-100 zł/kg.

Zależności:

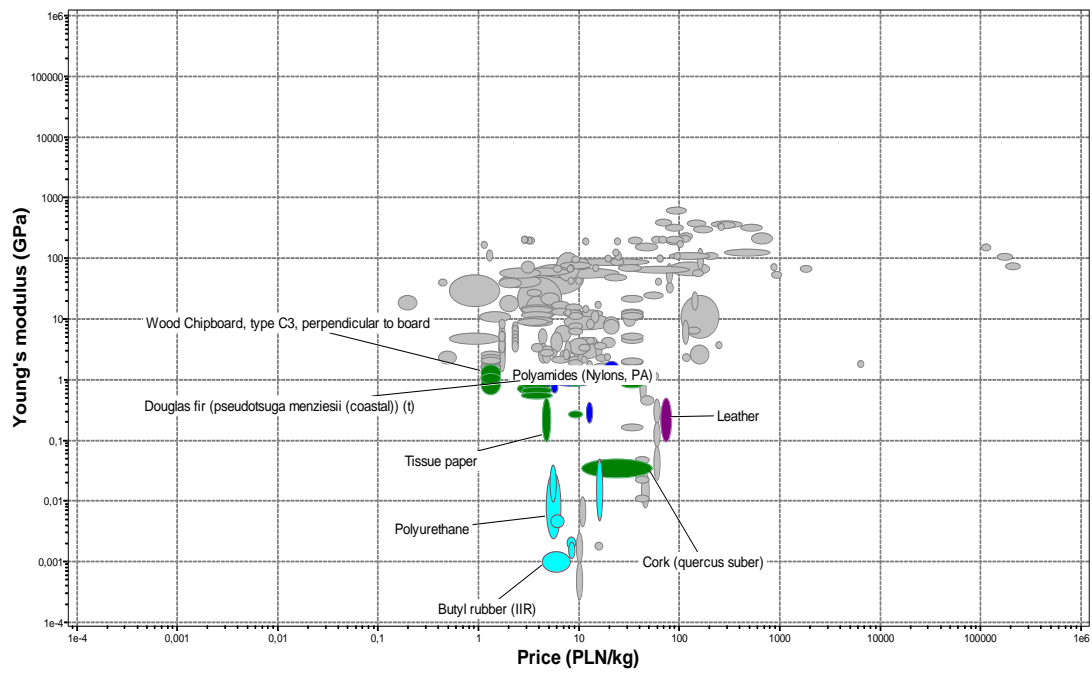
Oś x – Moduł Younga, oś y – cena.

Wartości:

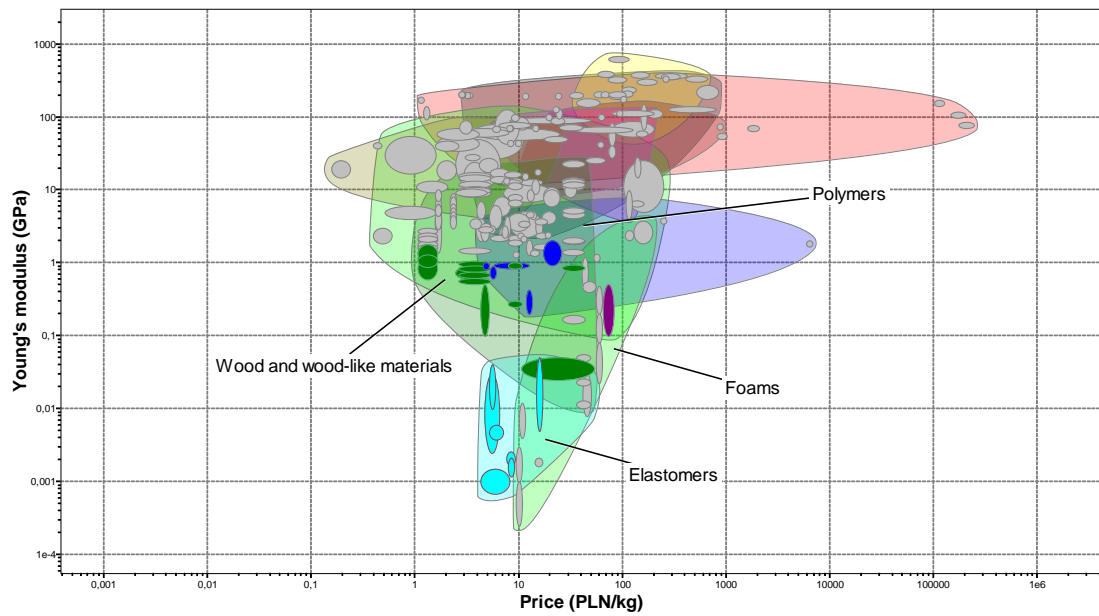
- moduł Younga – 0,1 – 1000 MPa,
- cena – 1-100 zł.

Na rysunku 10. przedstawiono kryterium nr 5 zależności modułu Younga od ceny, na którym widoczne są materiały wyłonione na podstawie wartości zadanych parametrów – wytrzymałość na ściskanie i gęstości. Z grupy 29 (wyodrębnionych na podstawie poprzednich parametrów) materiałów z modułu Limit Stage programu Ansys Granta EduPack wyłonione zostało

27 materiałów. Są to m.in. poliuretan, korek, kauczuk naturalny i EVA. Na rysunku 11. przedstawiony został wykres ogólny z określeniem grup, do których przynależą wyłonione materiały.



Rys. 10. Wykres Ashby'ego zależności modułu Younga od ceny, Ansys Granta EduPack 2021 [11].



Rys. 11. Wykres Ashby'ego zależności modułu Younga od ceny z określeniem grup, do których należą wyłonione materiały, Ansys Granta EduPack 2021 [11].

4. Wyniki i podsumowanie

Na podstawie utworzonych wykresów Ashby'ego w programie Ansys Granta EduPack wybrane zostały 4 materiały, których parametry wykorzystano do analizy modeli. Ich właściwości przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Właściwości wyodrębnionych materiałów; opracowanie własne na podstawie danych programu Ansys Granta EduPack 2021 [11].

Materiał	Gęstość [kg/m³]	Moduł Younga [MPa]	Współczynnik Poissona
Korek	240	50	0,4
Poliuretan	1210	30	0,49
EVA	955	40	0,49
Kauczuk naturalny	970	2,1	0,499

Przyjęte kryteria pozwoliły wyłonić materiały takie, jak korek, poliuretan, EVA oraz kauczuk naturalny. Materiały te spełniają wszystkie założenia. Ich gęstość, a zatem też masa pozwala na komfortowe użytkowanie, odkształcają się w zadanym zakresie bez uszkodzeń, co daje im najlepsze spośród pozostałych materiałów właściwości absorbujące energię uderzenia. Są one również odporne na kruche pękanie, co wydłuża ich żywotność. Ich cena jest względnie nieduża, w granicach od 1-100 zł, jak np. korek, którego cena wynosi od 10,5 do 52,7 zł za kg. Wszystkie spośród wybranych materiałów należą także do grupy biomateriałów, a zatem mogą mieć one bezpośredni kontakt z tkankami organizmu człowieka.

Program Ansys Granta EduPack 2021 wykorzystany do wyboru materiału spełniającego kryteria przyjęte w projekcie, charakteryzuje się łatwością posługiwania, dokładnością trafienia i umożliwia wygodny wybór materiału do zastosowań inżynierskich podczas projektowania. Szeroki wybór oferowanych przez program materiałów pozwolił na wyłonienie materiałów popularnych, ale także takich, których wybór nie jest oczywisty z uwagi na to że mowa o materiałach które z różnych względów są rzadziej stosowane w praktyce inżynierskiej. Niemniej jednak równie dobrze spełniają przyjęte kryteria. Przedstawianie wyników doboru materiałów w postaci wykresów, pozwala ukazać zarówno grupy materiałów, jak również pozwala wykonać szczegółowe przeszukiwanie co prowadzi do dokładniejszej analizy uzyskanych wyników. Zastosowana metoda jest znacznym ułatwieniem w porównaniu do tradycyjnego procesu doboru materiałów bazujących na doświadczeniu czy polegającej na pracy ze statycznymi wykresami Ashby'ego. Praca z użyciem tego narzędzia w połączeniu z wiedzą i doświadczeniem użytkownika z zakresu materiałoznawstwa pozwoliła uzyskać zadowalające wyniki. Selekcja materiałów z wykorzystaniem Ansys Granta EduPack 2021 pozwoliła na efektywniejszą pracę przy realizacji tematu badawczego, jednocześnie istotnie skracając czas trwania poszukiwań.

Literatura

1. <https://www.aans.org/en/Patients/Neurosurgical-Conditions-and-Treatments/Traumatic-Brain-Injury> (dostęp z dnia 27.07.2021 r.)
2. Wiśniewska K., Jędrzejewska A., Ratajczak M., Klekiel T.: *Analysis of the Mechanical Properties of Impact Absorbing Structures Used in Military Helmets*. Biocybernetics and Biomedical Engineering – Current Trends and Challenges. Lecture Notes in Networks and Systems, 2021, Nr 293, s. 17-28.
3. Theeler B.J., Flynn F.G., Erickson J.C.: *Headaches after concussion in US soldiers returning from Iraq or Afghanistan*. Headache, 2010, 50(8), s. 1262-1272.
4. McKee A.C., Robinson M.E.: *Military-related traumatic brain injury and neurodegeneration*. Alzheimer's & dementia : the journal of the Alzheimer's Association, 2014, 10(3), s. 242–253.
5. Gholampour S., Hajirayat K., Erfanian A., Zali A. Z., Shakouri E.: *Investigating the Role of Helmet Layers in Reducing the Stress Applied During Head Injury Using FEM*. International Clinical Neuroscience Journal, 2017, 4(1), s. 4-11.
6. *Helmets: a road safety manual for decision-makers and practitioners*. World Health Organization, Geneva, 2006.
7. Radziszewski L.: *Kaski rowerowe. Konstrukcja, technologie, użytkowanie*. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2015.
8. <https://www.maskpol.com.pl/en/products/ballistic-helmet-hp-05> (dostęp z dnia 23.11.2021 r.)
9. <https://mesco.com.pl/ansys-granta-materialoznastwo-w-praktyce/> (dostęp z dnia 20.05.2022 r.)
10. Salimi Jazi M., Rezaei A, Karami G., Azarmi F., Ziejewski M.: *A computational study of influence of helmet padding materials on the human brain under ballistic impacts*. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2014, 17(12), s. 1368-1382.
11. Ansys Granta EduPack 2021 R2 Version: 21.2.0.
12. Ratajczak M., Ptak M., Chybowski L., Gawdzińska K., Będziński R.: *Material and Structural Modeling Aspects of Brain Tissue Deformation under Dynamic Loads*, Materials 12, 2019, Nr 2, 271.
13. Ratajczak M., Klekiel T., Sławiński G., Będziński R.: *Investigation of Helmet-Head Interaction in the Aspect of Craniocerebral Tissue Protection*. Current Trends in Biomedical Engineering and Bioimages Analysis: proceedings of the 21st Polish Conference on Biocybernetics and Biomedical Engineering - PCBEE 2019, 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020, Nr 1033, s. 308—315.
14. Będziński R., Ratajczak M., Klekiel T., Ptak M.: *Biomechanika struktur czaszkowo-mózgowych w kontekście obciążeń dynamicznych*. Symposium Biomechaniki Sportu i Rehabilitacji. Streszczenia. Akademia Wychowania Fizycznego Józefa Piłsudskiego w Warszawie, 2019, s. 7-8.
15. Jamroziak K., Bajkowski M., Bocian M., Polak S., Magier M., Kosobudzki M., Stepień R.: *Ballistic Head Protection in the Light of Injury Criteria in the Case of the Wz.93 Combat Helmet*. Applied Sciences, 2019, 9(13), 2702.

16. Ratajczak M., Ptak M., Kwiatkowski A., Kubicki K., Fernandes F.A.O., Wilhelm J., Dymek M., Sawicki M., Żółkiewski S.: *Symmetry of the Human Head—Are Symmetrical Models More Applicable in Numerical Analysis?* *Symmetry*, 2021, 13, 1252.
17. Arkusz K., Klekiel T., Sławiński G., Będziński R.: *Influence of energy absorbers on Malgaigne fracture mechanism in lumbar-pelvic system under vertical impact load.* *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2019, 22(3), s. 313 - 323.
18. Jędrzejewska A., Wiśniewska K., Ratajczak M., Klekiel T.: *Numerical investigations of mechanical properties of head protection systems against the effects of dynamic loads.* *Innovations in Biomedical Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing* (w druku).