

RECENZJA

rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Aleksandra Dudy pt. „Efektywność zastosowania materiału z recyklingu opon samochodowych w strefach przejściowych obiektów mostowych”

1. Podstawa opracowania recenzji

Niniejszą recenzję pracy doktorskiej mgr inż. Aleksandra Dudy pt. „*Efektywność zastosowania materiału z recyklingu opon samochodowych w strefach przejściowych obiektów mostowych*” wykonano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej – Pana prof. dr hab. inż. Tomasza Siwowskiego z dnia 3 stycznia 2022 roku.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawę doktorską, zgodnie z art. 187, ust. 3 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r., poz. 1668 z późn. zm.), stanowi zbiór opublikowanych i powiązanych ze sobą tematycznie następujących artykułów naukowych:

- [I] Duda A. (2017): Wybrane sposoby wykorzystania zużytych opon samochodowych w budownictwie komunikacyjnym, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury / Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA*, XXXIV, 64 (4/I/17), 379-394.
- [II] Duda A., Siwowski T. (2021): Waste tyre bales in road engineering: an overview of applications, *Archives of Civil Engineering*, LXVII, 3.
- [III] Duda A., Siwowski T. (2021): Experimental determination of mechanical properties of waste tyre bales used for geotechnical applications, *Materials*, 14, 3310.
- [IV] Duda A., Kida M., Ziembowicz S., Koszelnik P. (2020): Application of material from used car tyres in geotechnics – an environmental impact analysis, *PeerJ* 8:e9546.
- [V] Duda A., Siwowski T. (2020): Pressure evaluation of bridge abutment backfill made of waste tyre bales and shreds: experimental and numerical study, *Transportation Geotechnics*, 24.
- [VI] Duda A., Siwowski T. (2021): Experimental study on earth pressure reduction of waste tire bales used as a backfill for rigid retaining structures, *Studia Geotechnica et Mechanica*, 1-14.
- [VII] Duda A., Siwowski T. (2021): Stability and settlement analysis of a lightweight embankment filled with waste tyre bales over soft ground, *Transportation Infrastructure Geotechnology*.
- [VIII] Duda A., Siwowski T. (2020): Experimental investigation and first application of lightweight abutment backfill made of used tyre bales, In: Blikharsky Z., Koszelnik P., Mesaros P. (eds), *Proceedings of CEE 2019, Lecture Notes in Civil Engineering*, 47, Springer, Cham.

Uzupełnieniem wymienionych artykułów jest Autoreferat, w którym Doktorant przedstawił przedmiot rozprawy, problematykę badawczą, główne cele rozprawy, streszczył poszczególne publikacje, a także zawarł podsumowanie oraz wnioski końcowe wraz z propozycją dalszych badań.

Autoreferat został podzielony na 8 rozdziałów, a te zostały podzielone na podrozdziały. Do pracy doktorskiej zostały dołączone streszczenia w języku polskim i języku angielskim.

2.1. Aktualny stan wiedzy w zakresie tematyki rozprawy

W Polsce i w innych krajach, z uwagi na stale wzrastającą liczbę samochodów, wzrasta liczba zużytych opon, które są odpadem trwałym, nieulegającym naturalnemu rozkładowi, odpornym na wodę i ekstremalne temperatury. Opona samochodowa oprócz gumy zawiera kord tekstylny i stalowy, co utrudnia jej recykling w porównaniu z innymi materiałami. Największym zagrożeniem związanym ze składowaniem zużytych opon jest duże prawdopodobieństwo pożaru na składowiskach odpadów, wynikające m.in. z podpalenia, samozapłonu czy działań przyrody, takich jak uderzenie pioruna podczas burzy.

Bazując na klasyfikacji działań mających na celu rozwiązanie problemu zużytych opon samochodowych, m.in. wymienia się przygotowanie do ponownego użycia, recykling bądź odzysk energii, polegający na spalaniu opon w piecach cementowni lub z wykorzystaniem procesów mikrofalowych karbonatyzacji opon w elektrowniach.

Recykling materiałowy polega na rozdrobnieniu zużytej opony najczęściej przez cięcie i rozcieranie, młotkowanie, rozdrabnianie metodą kriogeniczną lub wodą pod wysokim ciśnieniem. Produktami końcowymi takiego działania są guma, druty stalowe oraz kord tekstylny, które podlegają dalszemu recyklingowi. W zależności od wielkości cząstek, materiały otrzymane ze zużytych opon można sklasyfikować jako opony cięte (>300 mm, połówki lub mniejsze), strzępy (40-300 mm), chipsy (10-50 mm), granulaty (1-10 mm) oraz miął (0-1 mm).

Strzępy i chipsy pełnią rolę kruszywa używanego do budowy nasypów drogowych, zasypek ścian oporowych, przyczółków mostowych, tuneli. Charakteryzują się około 3-krotnie niższym ciężarem objętościowym od standardowego kruszywa, 8-krotnie wyższą izolacyjnością cieplną, większą przepuszczalnością wody oraz generują około 2-krotnie mniejsze parcie boczne gruntu.

Granulaty znajdują zastosowanie przy budowie placów zabaw, boisk sportowych, ścieżek do biegania, podkładów amortyzujących uderzenia, barier dźwiękochłonnych. Miął oraz granulaty gumowy stosuje się również do modyfikacji składu asfaltu, aby nawierzchnie były trwalsze, bardziej elastyczne, odporniejsze na ścieranie, zmniejszające poślizg oraz hałas. Miął gumowy jest wykorzystywany m.in. do produkcji odzieży, dywaników samochodowych, mat dla zwierząt, wycieraczek, itp.

Recykling produktowy polega na ponownym wykorzystaniu w całości lub w części opon z ewentualnym zastosowaniem niskoenergetycznych procesów przetwarzania, np. odcięcie jednego profilu opony i wypełnienie jej kruszywem lub prasowanie opon w pakiety.

Recykling produktowy wykorzystuje unikatowe właściwości opon, takie jak: mały ciężar objętościowy, dobra izolacyjność termiczna i akustyczna, właściwości drenażowe, wibroizolacyjne, dobre właściwości mechaniczne w porównaniu z właściwościami standardowego kruszywa. Zużyte opony, poddane recyklingowi produktowemu, znajdują zastosowanie w budownictwie komunikacyjnym i hydrotechnicznym; m.in. mogą stanowić wypełnienie nasypów oraz konstrukcji oporowych, podbudowę dróg, zabezpieczenie przeciwoerozyjne brzegów rzek i nabrzeży. Dzięki zastosowaniu recyklingu produktowego opon, w przypadku prasowania opon w pakiety redukuje się objętość składowanych opon oraz ułatwia się ich transport i wbudowanie w konstrukcję ziemną, a co za tym idzie, ogranicza się koszty budowy.

Z uwagi na fakt, że jednym z newralgicznych miejsc w ciągu drogowym jest „strefa przejściowa”, czyli połączenie obiektu mostowego z nasypem dojazdu, Autor rozprawy zajął się sposobem wykorzystania materiału z recyklingu opon samochodowych w tych strefach.

Ponieważ sztywność podłoża pod nawierzchnią jezdni drogowej lub kolejowej na nasypie jest mniejsza niż sztywność betonowego przyczółka mostowego, można przewidzieć, że osiadania jezdni na nasypie będą większe. W związku z tym, ważne jest, aby przyjąć takie rozwiązanie, które minimalizuje różnicę osiadań w strefie przejściowej. Dojazd do obiektu mostowego powinien być odpowiednio zabezpieczony w celu wyrównania osiadań w strefie styku z przyczółkiem i/lub zapobiegania powstawania nierówności nawierzchni drogi oraz powinien zapewnić stabilność wzajemnych oddziaływań konstrukcji obiektu mostowego i nasypu drogowego.

Szczególne znaczenie ma właściwe rozwiązanie stref przejściowych w przypadku obiektów mostowych o schematach statycznych ramowych. Podczas letniego wydłużania się przęseł obiektów ramowych pod wpływem oddziaływań termicznych następuje parcie korpusów podpór na zasypkę mostową wywołujące odpór pośredni gruntu. Pod działaniem obciążenia bocznego od korpusu przyczółka, zasypka, jako element o małej sztywności poprzecznej, ulega dogęszczeniu. Natomiast podczas zimowego skracania się przęseł obiektów ramowych pod działaniem oddziaływań termicznych następuje rozluźnienie zasypki. Cykliczność tych zjawisk termicznych wraz z dynamicznym oddziaływaniem pionowym od ruchu pojazdów oraz działaniem wód opadowych powodują deformacje zasypki, a co za tym idzie powstanie deformacji i pęknięć nawierzchni, w szczególności przy braku urządzeń dylatacyjnych.

Oprócz obciążeń pionowych od ciężaru przęseł oraz od obciążeń użytkowych, zasadniczy wpływ na gabaryty przyczółków mostowych i ich fundamentów mają siły parcia od ciężaru zasypki, wzrastające wraz z wysokością nasypów dojazdów do obiektu mostowego. Redukcja parcia od zasypki wpływa na zmniejszenie gabarytów przyczółków i ich fundamentów, dlatego typowym rozwiązaniem redukującym parcie działające na przyczółki obiektów mostowych jest wykonanie zasypki w formie gruntu zbrojonego. Do wad tego rozwiązania należy jednak efekt dogęszczania się gruntu zasypki oraz wysoki koszt tej technologii. Można również wykorzystać jako materiał zasypki keramzyt, który redukuje parcie na przyczółki mostowe. Wadą takiego rozwiązania jest wysoki koszt zasypki z keramzytu, zdolność ziaren keramzytu do rozmakania pod działaniem wody oraz kruszenie się podczas zagęszczania, co może powodować dodatkowe obciążenie oraz prowadzić do zamulenia drenażu zasypki.

Dobrym i innowacyjnym rozwiązaniem dla efektywnego ukształtowania i wykonania strefy przejściowej obiektów mostowych jest zastosowaniem lekkich materiałów, a zarazem produktów pochodzących z recyklingu zużytych opon samochodowych. Takie rozwiązanie cechuje się odpornością na działanie cyklicznych oddziaływań pionowych i poziomych, tj. sprężystością i stałością kształtu, zmniejszeniem kosztów wykonania, skróceniem czasu realizacji robót budowlanych, trwałością i redukcją kosztów utrzymania.

Biorąc powyższe pod uwagę, Autor rozprawy doktorskiej podjął się oceny efektywności wykorzystania materiałów z recyklingu opon samochodowych w strefie przejściowej obiektów mostowych. Jest to pierwsza próba oceny i zastosowania takiego rozwiązania technologicznego w mostownictwie w Polsce.

2.2. Struktura rozprawy doktorskiej

Zrealizowany przez mgr inż. Aleksandra Dudę szeroki zakres prac naukowo-badawczych, został opisany w siedmiu rozdziałach Autoreferatu oraz szczegółowo przedstawiony w ośmiu publikacjach naukowych, tworzących zasadniczą zawartość rozprawy.

Poniżej przedstawiono zakres tematyczny artykułów naukowych.

Artykuł [I] - Duda A. (2017): Wybrane sposoby wykorzystania zużytych opon samochodowych w budownictwie komunikacyjnym, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury / Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA, XXXIV, 64 (4/I/17), 379-394.*

Autor w artykule [I] przedstawia m.in. sposoby wykorzystania zużytych opon dla recyklingu oraz zastosowanie ich w budownictwie komunikacyjnym jako materiału tłumiącego, materiału filtracyjnego, lekkich wypełniaczy, stabilizacji zboczy. Doktorant przedstawił uwarunkowania prawne w Polsce i Unii Europejskiej dla recyklingu opon, jak również zestawił projekty europejskie dotyczące wykorzystania zużytych opon (Eco-lanes, Anagennis, PERSUADE, RECTYRE, ROADTIRE, ReUse). Ponadto, mgr inż. Aleksander Duda opisał przykładowe realizacje w budownictwie komunikacyjnym z wykorzystaniem zużytych opon samochodowych, takie jak: nasyp autostradowy w Portland i w Virginii (Stany Zjednoczone), zasypkę przyczółka mostu w Spring, zasypkę za przyczółkiem wiaduktu w Tompshan (Stany Zjednoczone), naprawę osuwiska drogowego w Ukiah, naprawę skarpy przy autostradzie 30 w Teksasie (Stany Zjednoczone), wykorzystanie materiałów lekkich w postaci pakietów sprasowanych zużytych opon samochodowych SZOS na autostradzie A421 w Marston Moretaine (Wielka Brytania).

Artykuł [II] - Duda A., Siwowski T. (2021): Waste tyre bales in road engineering: an overview of applications, *Archives of Civil Engineering, LXVII, 3.*

W artykule [II] dokonano przeglądu wiedzy na temat zastosowań pakietów SZOS w budownictwie drogowym. Podano w nim podstawowe właściwości geometryczne, masowe i inżynierskie pakietów SZOS, ustalone na podstawie kombinacji wyników ograniczonej liczby badań laboratoryjnych i terenowych oraz scharakteryzowano metody wykorzystania pakietów SZOS w budownictwie drogowym, w tym do budowy nasypów, stabilizacji i napraw zboczy, fundamentowania dróg na słabym podłożu oraz budowy grawitacyjnych konstrukcji oporowych typu gabionowego. Jak stwierdził Autor pracy, pomimo dużego potencjału pakietów SZOS w zastosowaniu do stref przejściowych obiektów mostowych, nie znaleziono w piśmiennictwie przykładów takich wdrożeń przez 20 lat użytkowania pakietów w budownictwie drogowym. Jak dowodzi Autor rozprawy, brak metod projektowych oraz obawa przed zanieczyszczeniami gleby i wody ograniczała dotychczas liczbę projektów drogowych, w których wykorzystywano pakiety SZOS. Autorzy artykułu wykazali, że zastosowanie pakietów jako materiału wypełniającego w nasypach lub zasypkach oraz we wzmocnieniach podłoża i stabilizacji skarp może być bardzo efektywne i nie stanowi potencjalnego zagrożenia dla środowiska związanego z wymywaniem nieorganicznych lub organicznych chemikaliów. Wykazano również potencjalne obszary zastosowania pakietów SZOS, na przykład jako poduszki chroniące podpory mostów przed uderzeniem, ekrany dźwiękochłonne oraz ochrona przed erozją.

Artykuł [III] - Duda A., Siwowski T. (2021): Experimental determination of mechanical properties of waste tyre bales used for geotechnical applications, *Materials, 14, 3310.*

Badania właściwości mechanicznych pakietów SZOS niezbędnych do projektowania i obliczeń inżynierskich obejmują określenie sztywności (ściśliwości) oraz wytrzymałości na ściskanie pakietów, określenie wytrzymałości na ścinanie pomiędzy pakietami oraz pomiędzy pakietami a materiałem zasypowym, określenie współczynnika pełzania pakietów, a także ich zachowania pod obciążeniem cyklicznym.

Autor rozprawy doktorskiej badał pakiety SZOS składające się z około 135 opon samochodowych, sprasowanych w prostopadłościan o wymiarach 2,05 x 1,30 x 0,75 m

i mocowanych za pomocą drutu. Masa pakietu wynosiła około 1030 kg, średnia objętość około $2,0 \text{ m}^3$, gęstość określona dla średniej objętości to około $0,515 \text{ Mg/m}^3$. Wartość modułu Younga pakietów SZOS wynosi około 826 kPa, a współczynnika Poissona 0,11. Wytrzymałość na ścinanie dla suchego styku pakiet – pakiet została scharakteryzowana przez spójność $c=0,03 \text{ kPa}$ i kąt tarcia wewnętrznego $\varphi=46,0^\circ$. Te same parametry na styku pakiet – materiał zasypowy (wilgotny piasek średni) wynoszą: $c=0,77 \text{ kPa}$ i $\varphi=29,6^\circ$. Deformacja pakietów wywołana pełzaniem pod wpływem utrzymującego się obciążenia pionowego w okresie do pięciu dni stanowi 6,1% średniej wysokości pakietu. Znaczna część tej deformacji (około 95%) wystąpiła w pierwszym dniu, a maksymalna deformacja pojawiła się w ciągu trzech dni. Obliczony na podstawie badań roczny współczynnik pełzania można oszacować jako 0,0039, a zmiana sprężystości pakietów pod obciążeniem cyklicznym jest prawie stała w ciągu około 400 minut obciążenia. Pakiety nie wykazywały degradacji sztywności pod wpływem obciążenia cyklicznego.

W artykule [III] można znaleźć szczegółowe wnioski z badań właściwości fizycznych i mechanicznych pakietów SZOS.

Artykuł [IV] - Duda A., Kida M., Ziembowicz S., Koszelnik P. (2020): Application of material from used car tyres in geotechnics – an environmental impact analysis, PeerJ8:e9546.

W artykule [IV] przedstawiono przegląd wybranych badań nad identyfikacją substancji niebezpiecznych wchodzących w skład zużytych opon i ocenę ich wpływu na środowisko. Następnie na podstawie wniosków z przeglądu Autor zaplanował własne badania środowiskowe pakietów SZOS. Badania wykazały, że nienaruszone opony są mniej podatne na wypłukiwanie szkodliwych substancji niż rozdrobiona guma z opon, gdyż znacznie mniejsza jest tzw. dostępna powierzchnia wymywania. Zastosowanie całych opon jest korzystne z ekologicznego punktu widzenia.

Celem przeprowadzonych przez mgr inż. Aleksandra Dudę badań środowiskowych było ustalenie czy pakiety SZOS powodują zanieczyszczenie wód opadowych, a następnie gruntowych i gleby, a także jaki jest poziom wymywania potencjalnych niepożądanych substancji wchodzących w skład opon. Celem badań było również upewnienie się, że efekt długotrwałego kontaktu pakietów z wodą nie spowoduje wypłukiwania szkodliwych składników z opony.

Szczegółowa analiza wyników badań fizykochemicznych, która została przedstawiona w artykule [IV], potwierdziła, że zachodzi konieczność wstępnego mycia opon przed prasowaniem w pakiety ze względu na brak pewności o stanie zużytych opon przekazanych przez użytkownika. Ponadto, utwierdziła Autora pracy w przekonaniu o bezpieczeństwie środowiskowym stosowania pakietów SZOS w konstrukcjach i budowlach ziemnych.

Artykuł [V] - Duda A., Siwowski T. (2020): Pressure evaluation of bridge abutment backfill made of waste tyre bales and shreds: experimental and numerical study, Transportation Geotechnics, 24.

W artykule [V] zostały opisane badania przeprowadzone na pełnowymiarowym stanowisku badawczym symulującym rzeczywistą strefę przejściową obiektu mostowego. Na podstawie wyników tych badań Autor ocenił zachowanie się zasypki z pakietów SZOS w porównaniu z zasypką konwencjonalną z piasku, w szczególności redukcję parcia na przyczółek dzięki zastosowaniu pakietów pod wpływem oddziaływań termicznych.

Badania polowe wykazały, że zastosowanie zasypki z pakietów SZOS z pionową warstwą buforową ze strzępów gumowych może efektywnie zredukować parcie czynne, spoczynkowe oraz bierne na ścianę tylną przyczółka, umożliwiając w ten sposób bardziej ekonomiczne projektowanie przyczółka. Średni stopień redukcji parcia wyniósł około 80%. Ponadto, parcie na przyczółek generowane przez zasypkę z pakietów SZOS i warstwy

buforowej ze strzępów gumowych ma charakter parcia silosowego, a zasypkę z pakietów SZOS wypełniającą klin odłamu konstrukcji oporowej można traktować w obliczeniach jako samostateczny blok niegenerujący parcia.

W artykule [V] znajduje się również opis modelu numerycznego 2D strefy przejściowej z pakietami SZOS oraz wyniki walidacji tego modelu. Model numeryczny został zbudowany za pomocą oprogramowania GEO5 z wykorzystaniem parametrów materiałowych wyznaczonych na podstawie badań doświadczalnych. Analiza MES potwierdziła wysoką skuteczność stosowania pakietów SZOS jako zasypki, zarówno w tradycyjnych, jak i zintegrowanych przyczółkach mostowych dzięki znacznemu zmniejszeniu parcia na ścianę przyczółka. W artykule [V] znajdują się szczegółowe informacje na temat oceny efektywności z wykorzystaniem symulacji numerycznych.

Artykuł [VI] - Duda A., Siwowski T. (2021): Experimental study on earth pressure reduction of waste tire bales used as a backfill for rigid retaining structures, *Studia Geotechnica et Mechanica*, 1-14.

W artykule [VI] wyprowadzono i szczegółowo opisano wzory analityczne do obliczania parcia czynnego na ścianę przyczółka w zależności od rodzaju zastosowanej zasypki i przypadku obciążenia. Wykazano, że całkowita redukcja parcia gruntu dzięki zastosowaniu zasypki z pakietów SZOS wynosi około 70% dla przewarstwień z pasku średniego i około 40% dla przewarstwień sztucznych, tj. keramzytu i strzępów gumowych. Jednak w tym ostatnim przypadku można osiągnąć około 70% redukcję ciężaru zasypki w strefie przejściowej w porównaniu z konwencjonalną zasypką z piasku średniego. Ponadto, niezależnie od rodzaju zasypki oraz przewarstwień w przypadku pakietów SZOS geometria przyczółka ma istotny wpływ na wielkość czynnego parcia gruntu działającego na ścianę przyczółka.

Artykuł [VII] - Duda A., Siwowski T. (2021): Stability and settlement analysis of a lightweight embankment filled with waste tyre bales over soft ground, *Transportation Infrastructure Geotechnology*.

W artykule [VII] przedstawiono wykorzystanie modelu numerycznego do symulacji i oceny efektywności zastosowania pakietów SZOS przy wypełnieniu nasypu na słabym podłożu. Jak wynika z analiz Autorów artykułu [VII], zastosowanie pakietów SZOS zwiększa stateczność nasypu. W przypadku podłoża z gliny piaszczystej poślizg jest „bardzo mało prawdopodobny”, a dla gliny pylastej pakiety SZOS zmniejszają prawdopodobieństwo poślizgu. W nasypach z pakietami SZOS powierzchnia poślizgu znajduje się głównie w obrębie skarpy nasypu, wykazując dobrą stateczność na obrót niezależną od warunków podłoża. Z kolei zastosowanie pakietów SZOS w nasypie posadowionym na podłożu piaszczysto-gliniastym skutecznie redukuje osiadanie nasypu, niezależnie od typu przewarstwień z kruszywa. Ponadto, redukcja naprężeń normalnych w podłożu dzięki zastosowaniu wypełnienia nasypu z pakietów SZOS, w stosunku do nasypu konwencjonalnego, mieści się w przedziale 20-26%, a stopień wykorzystania nośności podłoża wynosi jedynie 39% i 86% dla gliny piaszczystej i pylastej.

Artykuł [VIII] - Duda A., Siwowski T. (2020): Experimental investigation and first application of lightweight abutment backfill made of used tyre bales, in: Blikharsky Z., Koszelnik P., Mesaros P. (eds), *Proceedings of CEE 2019, Lecture Notes in Civil Engineering*, 47, Springer, Cham.

Opis wdrożenia pakietów SZOS w strefie przejściowej obiektu mostowego został przedstawiony w artykule [VIII]. Pozytywne wyniki badań laboratoryjnych i terenowych pozwoliły na pierwsze zastosowanie pakietów SZOS w strefie przejściowej przyczółków

trójprzęsłowego mostu ciągłego zlokalizowanego w Sielnicy, w południowo-wschodniej części Polski. Z uwagi na złożony stan naprężeń wywołany zakotwieniem przęseł w obu przyczółkach pakiety SZOS zostały wykorzystane do redukcji parcia oraz odciążenia fundamentów obu podpór.

Szczegóły wykonania strefy przejściowej z pakietów SZOS, a następnie wnioski z przeprowadzonego monitoringu stref przejściowych i dojazdów prowadzone przez Autora rozprawy zostały przedstawione w artykule [VIII].

Strukturę i zawartość rozprawy doktorskiej, jak również tytuł rozprawy oceniam bardzo pozytywnie.

3. Ocena dorobku rozprawy

Podjęta przez Autora rozprawy problematyka naukowa obejmuje ocenę efektywności zastosowania technologii wykorzystującej materiał z recyklingu zużytych opon samochodowych w strefach przejściowych obiektów mostowych i dojazdach do tych obiektów. Wykorzystana przez Autora technologia obejmuje zastosowanie tzw. pakietów sprasowanych zużytych opon samochodowych (SZOS), jako najbardziej efektywnej formy produktowego recyklingu opon.

Badania naukowe przeprowadzone przez mgr inż. Aleksandra Dudę w szczególności dotyczyły obiektów mostowych o schemacie ramowym (zintegrowanych), w których problematyka stref przejściowych oraz wpływów na nie oddziaływań termicznych jest bardzo ważna.

Jak dowodzi Doktorant, w strefie przejściowej przez zastąpienie konwencjonalnej zasypki przyczółka mostowego pakietami SZOS można uzyskać znaczną redukcję sił poziomych od parcia zasypki, co z kolei pozwala na zaprojektowanie stosunkowo lekkiej konstrukcji przyczółka i daje oszczędności materiałowe. Lekka i samostateczna zasypka w postaci bloku pakietów SZOS może zmniejszyć parcie na konstrukcję podpory. Ponadto, przepuszczalne pakiety SZOS zapewniają bardzo dobry drenaż zasypki, dzięki czemu mogą zastąpić warstwę drenażową stosowaną w rozwiązaniach konwencjonalnych w celu zminimalizowania sił hydrostatycznych działających na przyczółek.

W przypadku mostów zintegrowanych, jak dowodzi Autor rozprawy, zalety pakietów SZOS mogą być jeszcze bardziej efektywnie wykorzystane, gdyż w mostach zintegrowanych rozszerzalność termiczna przęseł wywołuje duże parcie bierne powstające na tylnej ścianie przyczółka i generuje wysokie naprężenia w jego korpusie, natomiast można tego uniknąć przez zastosowanie w zasypce ściśliwej, elastycznej warstwy amortyzującej o małej sztywności, czyli bloku pakietów SZOS.

W przypadku dojazdów do obiektów mostowych Autor rozprawy zajął się poprawą stateczności nasypu wypełnionego pakietami SZOS oraz redukcją osiadań nasypu oraz redukcją naprężeń w podłożu nasypu dzięki zastosowaniu pakietów SZOS wypełniających jego korpus.

Niewątpliwie ważnym zagadnieniem analizowanym przez Doktoranta, była ocena potencjalnego zagrożenia środowiskowego, związanego z umieszczaniem na stałe w gruncie materiałów z recyklingu zużytych opon samochodowych.

Głównymi celami rozprawy doktorskiej było doświadczalne wyznaczenie właściwości fizycznych i mechanicznych pakietów SZOS, ocena wpływu pakietów SZOS na środowisko oraz ocena strefy przejściowej obiektu mostowego wypełnionej zasypką z pakietów SZOS, w szczególności pod wpływem symulowanych oddziaływań termicznych.

Dodatkowo, Autor rozprawy za cel postawił sobie opracowanie i walidację modelu numerycznego (2D) strefy przejściowej i dojazdu do obiektu mostowego wypełnionego

pakietami SZOS oraz analityczną i numeryczną ocenę efektywności zastosowania pakietów SZOS w strefach przejściowych i dojazdach do obiektu mostowego.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że badania naukowe przedstawione w rozprawie, mgr inż. Aleksander Duda wykonał w ramach projektu naukowo-badawczego pt.: „*Re-Use: Innowacyjne materiały z recyklingu zwiększające trwałość obiektów mostowych*”, współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach projektu INNOTECH.

Do rozwiązania postawionych przez siebie celów pracy, mgr inż. Aleksander Duda przeprowadził:

- przegląd dotychczasowej wiedzy, obejmujący zarówno badania, jak i zastosowania pakietów SZOS w budownictwie drogowym,
- badania laboratoryjne, dzięki którym wyznaczył właściwości fizyczne i mechaniczne pakietów SZOS oraz przeprowadził ocenę zagrożenia środowiskowego,
- badania terenowe, obejmujące m.in. zaprojektowanie i wykonanie pełnowymiarowego stanowiska badawczego symulującego strefę przejściową obiektu mostowego,
- prace analityczne oraz symulacje numeryczne stref przejściowych i nasypów dojazdów zbudowanych z pakietów SZOS. Obie metody obliczeniowe zostały zwalidowane na podstawie wyników badań doświadczalnych.

Zakres prac naukowo-badawczych został opisany przez Doktoranta w kolejnych rozdziałach Autoreferatu oraz szczegółowo przedstawiony w ośmiu publikacjach naukowych, tworzących zasadniczą zawartość rozprawy doktorskiej.

Uważam, że postawione na początku rozprawy doktorskiej przez mgr inż. Aleksandra Dudę cele zostały osiągnięte.

4. Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

Rozprawa doktorska, na którą składa się zbiór 8 publikacji została napisana przez mgr inż. Aleksandra Dudę w języku angielskim (7 artykułów w Czasopismach: Archives of Civil Engineering, Materials, PeerJ, Transportation Geotechnics, Studies Geotechnica et Mechanica, Transportation Infrastructure Geotechnology, Proceedings of CEE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering) i w języku polskim (1 artykuł: Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury oraz Autoreferat).

Fotografie, wykresy i tablice zostały bardzo starannie opracowane. Na początku pracy Doktorant podał spis opublikowanych artykułów stanowiących rozprawę doktorską, przedstawił przedmiot rozprawy, problematykę naukową oraz określił cel i zakres pracy.

Występujące w pracy drobne usterki redakcyjne, np. brak cytowania w tekście Autoreferatu niektórych publikacji ([4], [13], [17], [37], [40], [42], [51], [55], [58]) lub błędy w cytowaniach (zamiast publikacji [12], [50], [54], [57] powinny być cytowane publikacje, kolejno: [13], [51], [55], [58]), czy też brak objaśnienia symbolu w tabeli (Tabela 6.1 – symbol *) nie obniżają w żaden sposób wartości merytorycznej pracy doktorskiej.

Po zapoznaniu się z treścią pracy nasuwają się następujące pytania:

- czy Autor rozprawy mając do dyspozycji obszerną bazę danych doświadczalnych planuje opracowanie i opublikowanie wytycznych/instrukcji ułatwiających inżynierom projektantom i wykonawcom szerokie stosowanie pakietów SZOS w budownictwie drogowym i mostowym?
- czy po doświadczeniach z realizacji projektu naukowo-badawczego „*Re-Use*” pojawiły się nowe zastosowania pakietów SZOS w budownictwie drogowym i/lub mostowym w kraju i za granicą?

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Autor rozprawy za cel prowadzonych przez siebie badań i analiz przyjął doświadczalne wyznaczenie właściwości fizycznych i mechanicznych pakietów SZOS, wykorzystywanych do projektowania i wdrożenia innowacyjnej technologii, jak również ocenę wpływu pakietów SZOS na środowisko. Ponadto, mgr inż. Aleksander Duda analizował strefę przejściową obiektu mostowego wypełnioną zasypką z pakietów SZOS, w szczególności pod wpływem symulowanych oddziaływań termicznych. Celem badań i analiz była również ocena efektywności zastosowania pakietów SZOS w strefach przejściowych i dojazdach do obiektu mostowego.

Autor rozprawy zrealizował szeroki zakres prac naukowo-badawczych, głównie w ramach projektu pt.: „*Re-Use: Innowacyjne materiały z recyklingu zwiększające trwałość obiektów mostowych*”.

Rozprawa doktorska mgr inż. Aleksandra Dudy zawiera:

- przegląd stanu wiedzy z zakresu recyklingu produktowego zużytych opon samochodowych oraz z zakresu zastosowania pakietów SZOS w budownictwie drogowym,
- wyznaczone doświadczalnie właściwości fizyczne i mechaniczne pakietów SZOS, w tym m.in. moduł Younga, współczynnik Poissona, wytrzymałość na ścinanie, tj. spójność i kąt tarcia wewnętrznego, współczynnik pełzania oraz zmianę sprężystości pakietów SZOS pod obciążeniem,
- ocenę środowiskową wpływu pakietów SZOS na środowisko, w tym potwierdzenie, że nie ma dowodów na to, że pakiety SZOS wbudowane w podłoże gruntowe stanowią realne lub potencjalne zanieczyszczenia lub zagrożenie dla jakości wód i gleby w okolicy wbudowania pakietów,
- analizę wyników badań polowych, które umożliwiły doświadczalną ocenę strefy przejściowej obiektu mostowego wypełnionej zasypką z pakietów SZOS, w szczególności pod wpływem symulowanych oddziaływań termicznych. Autor rozprawy wykazał, że zastosowanie zasypki z pakietów SZOS z pionową warstwą buforową ze strzępów gumowych może efektywnie zredukować parcie czynne na ścianę przyczółka, umożliwiając w ten sposób jego bardziej ekonomiczne projektowanie,
- model numeryczny strefy przejściowej wypełnionej pakietami SZOS i jego walidację bazującą na wynikach badań doświadczalnych,
- analityczną i numeryczną ocenę efektywności zastosowania pakietów SZOS w strefach przejściowych i nasypach dojazdów do obiektów mostowych. Autor rozprawy podał stopień redukcji parcia na ścianę przyczółka oraz wykazał stopień zwiększenia stateczności nasypu dojazdów przy zastosowaniu pakietów SZOS. Podał również ilościową redukcję osiadania nasypu na słabym podłożu oraz redukcję naprężeń normalnych w podłożu przy zastosowaniu pakietów SZOS do wypełnienia nasypu w stosunku do nasypu konwencjonalnego,
- kierunki dalszych badań w zakresie pakietów SZOS, obejmujące m.in. współpracę pakietów z geosyntetykami lub kompozytami włóknistymi w ośrodku gruntowym, poprawę sztywności wierzchniej warstwy pakietów SZOS zlokalizowanych bezpośrednio pod podbudową konstrukcji nawierzchni, zmianę sposobu łączenia sprasowanych w pakiet opon celem stosowania w ekstremalnie agresywnym środowisku gruntowym, zwiększenie estetyki konstrukcji oporowych wykonanych z pakietów SZOS oraz zasady projektowania konstrukcji geotechnicznych z wypełnieniem pakietami SZOS.

Reasumując, stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr inż. Aleksandra Dudy pt. „*Efektywność zastosowania materiału z recyklingu opon samochodowych w strefach przejściowych obiektów mostowych*” spełnia w całej rozciągłości warunki i wymagania

Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku (Dz.U. z 2017 r., poz. 1789 z późn. zm.) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Recenzowana rozprawa doktorska spełnia również art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r., poz. 1668 z późn. zm.) w brzmieniu:

- 1. Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.*
- 2. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne.*

Biorąc powyższe pod uwagę oraz moją pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej, wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej przez Radę Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Rzeszowskiej oraz dopuszczenie Pana mgr inż. Aleksandra Dudę do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Z uwagi na aktualny, bardzo interesujący i aplikacyjny temat badawczy, wnoszę również o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

