

Recenzja rozprawy doktorskiej

pani mgr Magdaleny Dobrowolskiej zatytułowanej

Muon Scattering Tomography as a Tool For Inspection of Large and Reinforced Concrete Structures

W wyniku oddziaływania promieniowania kosmicznego z atmosferą ziemską generowane są miony o energiach GeV. Poruszające się miony jonizują wzdłuż swego toru oraz są rozpraszane kulombowsko w polu jąder atomowych. Ponieważ kąt rozpraszania rośnie z liczbą atomową przenikanych materiałów, zrekonstruowana mapa rozpraszania jest narzędziem do ich identyfikacji. Ze względu na zasięgi mionów, przekraczające nawet setki metrów pod powierzchnię Ziemi, próbuje się wykorzystywać ten naturalny strumień cząstek do prowadzenia tomografii (obrazowania) struktur masywnych obiektów, np. piramid egipskich. Mniej spektakularna, choć o znacznie większym znaczeniu praktycznym, może stać się tomografia struktur żelbetonowych, pod kątem np. identyfikacji rodzaju i jakości występującego w nim zbrojenia.

Ocena układu rozprawy doktorskiej. Rozprawa doktorska pani mgr Magdaleny Dobrowolskiej zatytułowana "Muon Scattering Tomography (MST) as a Tool For Inspection of Large and Reinforced Concrete Structures" przedstawia wyniki badań dotyczących możliwości użycia metody MST do określenia parametrów zbrojenia w strukturach żelbetonowych. Składa się ona z 11 rozdziałów, uzupełnionych podziękowaniami oraz streszczeniami w języku angielskim i polskim. Praca poprzedzona jest oświadczeniem o zakresie wkładu autora do rozwoju metod używanych w pracy. Rozdział pierwszy stanowi podsumowanie osiągnięć naukowych Autorki, głównie publikacji i wystąpień konferencyjnych. Rozdziały 2-4 stanowią część teoretyczną rozprawy wraz z metodyką pracy. Rozdziały 5-7 zawierają zasadnicze wyniki pracy, dotyczące analizy modelowej zbrojenia w strukturach betonowych. Powstałe one w oparciu o cykl trzech publikacji w recenzowanych czasopismach z listy JRC, w których panie mgr Dobrowolska jest pierwszym autorem. W rozdziale 8 podjęto próbę częściowej eksperymentalnej weryfikacji symulacji Monte Carlo. Pracę zamyka rozdział 9, w którym przeprowadzono analizę możliwości zastosowania metody rozproszeń do obrazowania w radioterapii protonowej. Rozprawa kończy się spisem 114 rysunków, 5 tabel oraz spisem literatury obejmującym 105 pozycji. W podsumowaniu, układ pracy jest klasyczny, kompletny, logicznie uporządkowany i odpowiada stylowi rozpraw doktorskich publikowanych na Uniwersytecie w Bristolu.

Ocena zastosowanego piśmiennictwa: Zestaw pozycji literaturowych w większości obejmuje ostatnie dziesięciolecie, co świadczy o dużym zainteresowaniu rozwijaną tematyką i jej aktualnością. Literatura dotycząca radioterapii protonowej obejmuje ważne i cytowane pozycje w literaturze światowej.

Wskazanie i ocena celu pracy: Celem rozprawy było udoskonalenie metod nieniszczącego badania dużych żelbetonowych struktur z wykorzystaniem tomografii rozpraszania mionów (MST), w szczególności obiektów z kilkoma warstwami zbrojenia. Motywacją do podjęcia tego tematu jest zapotrzebowanie ze strony przemysłu wobec uniwersalnych metod badania masywnych obiektów betonowych. Autorka przeanalizowała również możliwość adaptacji metody MST do tomografii rozproszeniowej przy określeniu rozkładu gęstości tkanek w radioterapii protonowej. Cel rozprawy został jednoznacznie przedstawiony w rozdziale 1, gdzie omówiono i szczegółowo uzasadniono powody podjęcia powyższych badań, mimo że nie został on bezpośrednio wyartykułowany.

Ocena metodyki: Metoda identyfikacji parametrów prętów zbrojeniowych w blokach betonowych bazowała na pracy opublikowanej w 2013 roku przez zespół z Uniwersytetu Bristol. Metoda ta została twórczo rozwinięta przez Autorkę rozprawy i opisana w cyklu trzech artykułów, które ukazały się

w czasopismach Engineering Research Express (2020), Smart Materials and Structures (2021) oraz Journal of Instrumentation (2022). Podstawą tej metodyki był algorytm analizy sygnału do wykrywania obecności baniek gazowych w pojemnikach z odpadami promieniotwórczymi przy zastosowaniu tomografii mionowej. Algorytm ten został z powodzeniem rozszerzony w przypadku periodycznego ułożenia prętów zbrojeniowych poprzez włączenie metodyki fourierowskiej analizy sygnału. Umożliwiło to polepszenie rozdzielczości dla periodycznie ułożonych prętów zbrojeniowych, a w dalszej kolejności także określenie parametrów kolejnych, głębiej położonych warstwy zbrojenia.

Modelowanie detekcji mionów zostało przeprowadzone z wykorzystaniem program transportu promieniowania Geant 4 wykorzystując bazę danych dla promieniowania kosmicznego CRY. Modelowano hipotetyczny układ detekcyjny składający się z zestawu 6 par płyt detekcyjnych o wymiarach 1 m x 1 m lub 2 m x 2 m, zakładając 100% wydajność detekcji.

Ważnym elementem pracy była próba eksperymentalnego potwierdzenia możliwości identyfikacji parametrów zbrojenia przy pomocy metody MST, z wykorzystaniem detektora mionów zbudowanego z wykorzystaniem rezystancyjnych płyt szklanych o wysokiej rozdzielczości (GRPC). Takie równoległe płyty o wysokiej rezystancji elektrycznej umożliwiają zastosowanie silnego pola elektrycznego do detekcji cząstek naładowanych z rozdzielczością czasową rzędu pikosekund i wydajnością wystarczającą do rejestrowania mionów. Prototyp urządzenia wykorzystującego płyty GRPC powstał w wyniku współpracy Uniwersytetu w Bristolu i Atomic Weapon Establishment, dla skanowania kontenerów transportowych w poszukiwaniu specjalnych materiałów jądrowych. Bazując na tym, Autorka rozprawy zestawiła układ detektora mionowego z zespołu rezystancyjnych płyt szklanych o potencjalnie wysokiej rozdzielczości przestrzennej, rzędu 0.45 mm. Na skutek konieczności użycia jako gazu roboczego CO₂, zamiast, zabronionej przepisami środowiskowymi, mieszaniny tetrafluoroetanu i izobutanu, uzyskała znacznie niższą rozdzielczość przestrzenną na poziomie 14 – 22 mm i stosunkowo słabą wydajność pomiaru w granicach kilku procent. Autorka zastosowała zaawansowaną analizę sygnału, polegającą na m.in. na usuwaniu anomalnych sygnałów, analizie parametrów tła, jego fluktuacji i korekcji, a wreszcie określeniu miejsc przejścia mionu i kształtu (przebiegu) śladów mionów.

W podsumowaniu bardzo wysoko oceniam zaproponowaną metodykę pracy zarówno w zakresie wielostopniowej analizy sygnałów, przeprowadzonych symulacji Monte Carlo oraz metodyki przeprowadzenia eksperymentu, nawet z ograniczeniami wynikającymi z zastosowania CO₂. Pewnym uzupełnieniem tej analizy dla układu eksperymentalnego mogła być symulacja odpowiedzi systemu w jego rzeczywistej konfiguracji tj. z trygerem mniejszym niż detektory płytowe oraz detektorami płytowymi z obszarami nieaktywnymi.

W rozdziale 9 przedstawiono ciekawe podejście do rozwiązania jednej z największych bolączek radioterapii protonowej jaką jest określenie niepewności zasięgu wiązki protonów penetrujących ciało pacjenta. Konieczność stosowania marginesów dla skompensowania niepewności zasięgu ogranicza największą zaletę radioterapii protonowej jaką jest dobrze określony zasięg protonów. Podstawową wielkością w systemie planowania leczenia jest rozkład wartości zdolności hamowania protonów względem wody w funkcji energii protonów. Wielkość ta, uzyskiwana z obróbki obrazów rentgenowskiej tomografii komputerowej (CT), zależy jednak nie tylko od gęstości elektronowej ale i od rodzaju tkanki. Próbką polepszenia tych pomiarów jest tomografia wiązką protonową (pCT). Metoda ta rozważana jest głównie jako pomiar energii protonów „przeszywających” ciało pacjenta (energy-loss pCT). Jedną z proponowanych opcji pCT jest tomografia rozproszeniowa wykorzystująca zjawisko wielokrotnego rozpraszania kulombowskiego (MCS). W tej wersji tomografii badany parametrem jest rozkład mocy rozpraszania (scattering power) który, z pewnymi ograniczeniami, można skorelować ze zdolnością hamowania protonów. W niniejszej pracy Autorka modelowała pomiary rozproszeń wiązki protonów o energii 230 MeV w fantomie imitującym ciało pacjenta w celu identyfikacji elementów symulujących

narządy i tkanki. Symulowano podwójny układ pomiarowy, każdy składający się z 3 płyt detekcyjnych. Autorka zdawała sobie sprawę z trudności w zastosowaniu tej techniki gdyż, tak jak pokazała na rys.107, kąty rozproszenia wiązki protonowej o energii 230 MeV na różnych tkankach różnią się tylko nieznacznie, co bardzo utrudnia identyfikację danej tkanki. Jest to znacznie trudniejszy niż w przypadku pomiarów zbrojenia w betonie, gdzie parametry rozpraszania na prętach są zasadniczo różne od tych dla betonu.

Ocena części rozprawy zawierająca omówienie wyników badań wraz z uwagami do pracy

Zasadniczym wynikiem rozprawy doktorskiej było określenie metodą Monte Carlo, dla zaproponowanego hipotetycznego zestawu pomiarowego, zakresów wykrywalności zbrojenia w blokach betonowych oraz parametrów stosowanych prętów zbrojeniowych w różnych możliwych konfiguracjach bloków i zbrojenia. W obliczeniach modelowych z wykorzystaniem kodu transportu promieniowania Geant 4 Autorka pokazała, że dla ekspozycji trwającej 3 tygodnie możliwe jest wykrycie w betonie prętów zbrojeniowych o minimalnej średnicy prawie 34 mm i długości 100 cm. Jeśli mamy do czynienia z układem periodycznym zbrojenia, co zazwyczaj ma miejsce, analiza fourierowska sygnału detektora umożliwia wykrycie zbrojenia o średnicy 6 mm, czyli najmniejszej średnicy stosowanej w budownictwie. Wyniki pracy pokazały również, że metodą MST w powyższej konfiguracji pomiarowej można określić całkowitą objętość zastosowanych prętów zbrojeniowych z dokładnością 5% gdy całkowita objętość prętów przekracza 2500 cm³. Wyniki tych obliczeń są obiecujące i pokazują zakres stosowalności metody dla zaproponowanego układu pomiarowego opartego o zestawy rezystancyjnych płyt szklanych o wysokiej rozdzielczości.

Wyniki pomiarów na zestawionym przez Autorkę układzie detekcyjnym nie umożliwiły eksperymentalnej weryfikacji obliczeń modelowych ze względu na niemal dwa rzędy wielkości słabszą rozdzielczość układu pomiarowego z detektorami płytowymi wypełnionymi CO₂. Mimo tych zewnętrznych ograniczeń uważam, że przeprowadzone pomiary i zaawansowana obróbka sygnału była przykładem dobrze przemyślanego i przeprowadzonego eksperymentu. Niewątpliwie użycie właściwego gazu, kiedy stanie się on dostępny, umożliwi zastosowanie wypracowanej metody obróbki sygnału i praktyczne użycie prototypu układu pomiarowego.

Uzyskane wyniki symulacji rozpraszania protonów pozwoliły na rozróżnienie tylko obszarów o bardzo różnej gęstości np. powietrza i kości. Trudnością w tej metodzie są niewielkie różnice zdolności rozpraszania dla różnych tkanek i znaczące różnice zdolności rozpraszania wraz ze zmianą energii protonów penetrujących ciało człowieka. Mimo, że metoda jest dopiero na bardzo wstępnym etapie rozwoju, a symulacje przeprowadzone dla fantomu ciała człowieka nie doprowadziły do ilościowych wyników uważam, że zapoczątkowane przez Autorkę prace nad rozwojem algorytmów pCT są interesujące i warte kontynuowania.

Rozprawa jest napisana jasno, starannie, przejrzysto, z dobrze podaną metodyką, klarownymi podsumowaniami wyników i zasługuje na wyróżnienie. W trakcie czytania nasunęły mi się następujące uwagi:

- 1) Praca jeszcze bardziej zyskała by na ilościowej dyskusji wyników polegającej na porównaniu możliwości identyfikacji parametrów zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych przy pomocy tomografii mionowej z innymi metodami, takimi jak georadar, aktywna tomografia w podczerwieni, ultradźwięki czy radiografia. W chwili obecnej trudno zorientować się, gdzie leżą granice stosowalności innych metod i dla jakich parametrów konstrukcji żelbetowych tomografia mionowa mogłaby wykazać swoją wyższość. Jeśli takie informacje są dostępne, Autorka może się odnieść do tego zagadnienia podczas obrony rozprawy doktorskiej.

- 2) W rozważaniach dotyczących tomografii protonowej Autorka zastosowała układ detekcyjny składający się z detektorów krzemowych o wymiarach $80\text{ cm} \times 80\text{ cm} \times 100\text{ }\mu\text{m}$ i znakomitej rozdzielczości przestrzennej rzędu $20\text{ }\mu\text{m}$. Mimo to na uzyskanych obrazach trudno jest zidentyfikować obszary o różnej gęstości. Jakie czynniki wpływają na to? Co można jeszcze ulepszyć w tym układzie pomiarowym, aby uzyskać lepszy obraz tomograficzny?
- 3) Praca jest napisana bardzo dobrym stylem, jest zredagowana i wydana wyjątkowo starannie. W trakcie czytania udało mi się znaleźć zaledwie 3 usterki językowe:
 - (i) strona 40, linia 7 od dołu: jest thee: , winno być : three
 - (ii) strona 48, linia 1 od góry: jest consist, winno być consists
 - (iii) strona 110 linia 13 od góry, jest : form, winno być: from

Podsumowanie

Przestawiona mi do recenzji rozprawa doktorska pani mgr Magdaleny Dobrowolskiej jest ważnym opracowaniem naukowym, w której Autorka wykazała się znakomitą opanowaniem zarówno metodyki pracy obliczeniowej jak i eksperymentalnej. Rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego jakim jest ocena parametrów zbrojenia w betonie metodą tomografii mionowej. Podjęty temat jest ważny z punktu widzenia możliwości zastosowania metody w praktycznych pomiarach struktury zbrojenia elementów żelbetowych. Praca napisana jasnym dobrym językiem angielskim, zyskuje dodatkowo staranną edycję i dobrze przygotowanymi ilustracjami. Autorce nie tylko udało się uzyskać konkretne wyniki określające zakres stosowalności metody, ale również twórczo zastosowała metodę w dziedzinie tomografii protonowej, z potencjalnym zastosowaniem w medycynie. Pani mgr Magdalena Dobrowolska wykazała, że posiada doskonałe przygotowanie teoretyczne, świetnie rozumie fizykę zjawisk i matematykę obróbki sygnału oraz umie samodzielnego prowadzić pracę naukową.

Stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska pani mgr Magdaleny Dobrowolskiej spełnia z nadmiarem wymagania Ustawy o Stopniach i Tytułach Naukowych. Dlatego wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie Autorki do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Jednocześnie, że względu na wysoki poziom naukowy i osiągnięte wyniki wnoszę do Rady Naukowej o wyróżnienie rozprawy.

Uzasadnienie wyróżnienia rozprawy doktorskiej:

Rozprawa doktorska pani mgr Magdaleny Dobrowolskiej jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego, który polegał na opracowaniu metody identyfikacji parametrów zbrojenia w betonie wykorzystując naturalny strumień mionów promieniowania kosmicznego. Pani Dobrowolska była pierwszym autorem w trzech kolejnych publikacjach z listy JRC, co potwierdza jej zasadniczy wkład do prowadzonych badań. Wprowadziła pierwotną metodę modelowania i analizy sygnału była opracowana przez zespół z Uniwersytetu w Bristolu, ale Autorka w sposób twórczy ją rozwinęła i zastosowała. Użycie analizy fourierowskiej dla sygnału otrzymywanego z okresowo ułożonego zbrojenia znacznie zwiększyło czułość metody, pozwalając identyfikować pręty o średnicy zaledwie 6 mm. Zakres prowadzonych badań, uzyskane wyniki, ich potencjalne znaczenie praktyczne i zasadniczy wkład Autorki w prace prowadzone na Uniwersytecie w Bristolu w pełni uzasadniają wniosek o wyróżnienie rozprawy.

Paweł Olko, Instytut Fizyki Jądrowej PAN