

Prof. dr hab. inż. Bogusław Cyganek
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Instytut Elektroniki
cyganek@agh.edu.pl

Kraków, 10.10.2025

Recenzja rozprawy doktorskiej
Pana magistra inżyniera Marka Sochy
zatytułowanej:
Computer-Assisted Detection and Quantification of Low-Attenuation
Lung Patterns in CT Studies of COPD Patients

Wstęp

Recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej Pana magistra inżyniera Marka Sochy pt. „*Computer-Assisted Detection and Quantification of Low-Attenuation Lung Patterns in CT Studies of COPD Patients*”, która powstała w roku 2025 w Politechnice Śląskiej. Promotorem pracy jest Pani prof. dr hab. inż. Joanna Polańska. Przygotowanie recenzji zostało wykonane na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Informatyka Techniczna i Telekomunikacja, prof. dra hab. inż. Andrzeja Polańskiego. Rozprawa doktorska została napisana w języku angielskim. Recenzja sporządzona została w postaci odpowiedzi na pytania dotyczące rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Marka Sochy.

1. Problem badawczy i jego znaczenie

Jaki jest najważniejszy problem rozważany w rozprawie?

Jednym z podstawowych czynników wpływających na jakość życia społeczeństw jest stan zdrowia, który bezpośrednio zależy od zamożności społeczeństwa i – związanego z tym – dostępu do nowoczesnej medycyny, a w szczególności do szybkiej i skutecznej diagnostyki medycznej oraz efektywnych metod leczenia. Tematyka naukowa podjęta przez Pana mgra inż. Marka Sochę w jego rozprawie doktorskiej wpisuje się w ten obszar. Doktorant analizuje oraz proponuje metody diagnostyki układu oddechowego na podstawie danych pochodzących z tomografii komputerowej (ang. *computer tomography* – CT). Jest to metoda diagnostyczna, której powstanie sięga początku XX w., a pozwalająca na uzyskanie przekrojów badanego obiektu w postaci obrazów tomograficznych. Wykorzystuje ona złożenie projekcji obiektu wykonanych z różnych kierunków do utworzenia obrazów przekrojowych dwu-wymiarowych i przestrzennych trój-wymiarowych. Używane do tego systemy nazywane są tomografami komputerowymi, a sama tomografia znajduje szerokie zastosowania w medycynie i technice.

Z medycznego punktu widzenia, główny przedmiot zainteresowania podjęty w rozprawie Pana mgra inż. Marka Sochy to przewlekła obturacyjna choroba płuc (POChP). Jest to stosunkowo częste schorzenie układu oddechowego będące m.in. skutkiem zanieczyszczenia powietrza oraz paleniem tytoniu, a charakteryzujące się występowaniem rozedmy płuc, która jest stanem patologicznym

prowadzącym do trwałego uszkodzenia oraz destrukcji tkanki oraz funkcji płuc, jak również zapaleniem oskrzelików. Choroby płuc były również jednym z głównym powodów poważnych stanów oraz śmierci pacjentów chorych na COVID-19.

W rozprawie doktorskiej Pan mgr inż. Marek Socha analizuje wpływ oraz możliwości tzw. metod nienadzorowanych do wykrywania zmian w obrazach CT klatki piersiowej. Chodzi tutaj m.in. o badanie rozedmy płuc, w tym możliwości precyzyjnego wykrycia zmian rozedmowych, które różnią się kształtem i rozmieszczeniem. Do tego celu Autor wykorzystuje bazę danych COPDGene, jednakże z powodu braku obrazów poetykietowanych, które – gdyby były dostępne w znaczącej liczbie – umożliwiłyby trenowanie głębokich sieci neuronowych, ogranicza się do metod bazujących na wiedzy eksperckiej.

We wstępie swojej rozprawy Pan mgr inż. Marek Socha postawił następujące tezy badawcze¹:

1. *Techniki nienadzorowanego uczenia się wykazują potencjał w wykrywaniu zmian o niskiej atenuacji w obrazowaniu tomografii komputerowej (CT), oferując skuteczną alternatywę dla podejść nadzorowanych poprzez wykorzystanie wewnętrznych struktur danych bez potrzeby stosowania adnotowanych, treningowych zbiorów danych.*
2. *Objętość i rozkład przestrzenny obszarów rozedmowych zidentyfikowanych za pomocą zautomatyzowanych procesów wykrywania może służyć jako wstępne oszacowanie progresji POChP. Obszary te wykazują ilościowy i jakościowy związek z pomiarami spirometrycznymi zdefiniowanymi przez GOLD.*
3. *Aby zminimalizować liczbę wyników fałszywie dodatnich w segmentacji zmian o niskiej atenuacji i zmian rozedmowych, kluczowe jest skonstruowanie trójwymiarowego modelu struktury dróg oddechowych.*

Tezy te następnie próbował wykazać w kolejnych rozdziałach swojej rozprawy.

Zagadnienia naukowe podjęte przez Pana magistra inżyniera Marka Sochę mają duże znaczenie zarówno w aspekcie teoretycznym, jak i eksperymentalnym. Potencjalnie mogą one mieć istotne znaczenie w diagnostyce medycznej. Stąd też podjęty problem badawczy oceniam jako istotny. Praca Pana mgr inż. Marka Sochy ma charakter teoretyczno-doświadczalny.

Czy praca ma charakter naukowy?

Problemy podjęte w dysertacji doktorskiej Pana magistra inżyniera Marka Sochy mają charakter naukowy – w światowym środowisku naukowym ciągle trwają prace badawcze i rozwojowe w tym kierunku, jak również są publikowane nowe metody przetwarzania sygnałów pochodzących z tomografii komputerowej. Jednakże ciągle nie istnieją algorytmy i metody, które w pełni spełniałyby wymagane założenia. Dlatego istnieje potrzeba kontynuacji badań w tym zakresie, a dostarczenie nowych rozwiązań w dobie dominacji metod AI wymaga przede wszystkim opracowania nowych podejść i oryginalnych zbiorów danych. Podejście zaproponowane w rozprawie Pana mgr inż. Marka Sochy, a polegające na zastosowaniu metod bazujących na rozwiązaniach nieco starszych i nie wykorzystujące wprost uczenia głębokiego ma swoje uzasadnienie w braku dobrze poetykietowanych zbiorów danych. Do tego opracowane metody są nienadzorowane, co stanowi pewną przewagę właśnie w przypadku braku wspomnianych danych, które umożliwiłoby zastosowanie być może dokładniejszych w rezultacie metod nadzorowanych. Zarówno zagadnienia naukowe, jak i wyzwania

¹ Wersja polska zaczerpnięta z pliku „Streszczenie długie (pol)”, załączonego przez Doktoranta.

oraz sposoby ich rozwiązania zostały zaprezentowane w rozprawie doktorskiej Pana mgr inż. Marka Sochy.

Czy praca ma znaczenie praktyczne?

Podjęty przez Pana mgr inż. Marka Sochę problem badawczy niewątpliwie posiada istotny walor i znaczenie praktyczne w systemach diagnostyki medycznej. Jest to obszar niezwykle ważny, zarówno od strony naukowej, jak i potrzeb społecznych. Dlatego praca i wyniki otrzymane przez Pana mgr inż. Marka Sochę mogą mieć znaczenie praktyczne. Tym niemniej, przebiegają one niejako równolegle do prac związanych z opracowaniem dokładnych modeli opracowanych na podstawie danych – czyli bazujących na nowych i odpowiednio licznych repozytoriach danych poetykietowanych.

2. Wkład Autora

Jaki jest najważniejszy wkład Autora rozprawy?

W rozprawie doktorskiej Pan mgr inż. Marek Socha analizuje wpływ oraz możliwości tzw. metod nienadzorowanych do wykrywania zmian w obrazach CT klatki piersiowej. Chodzi tutaj m.in. o badanie rozedmy płuc, w tym możliwości precyzyjnego wykrycia zmian rozedmowych, które różnią się kształtem i rozmieszczeniem. W swoich pracach Doktorant koncentruje się na algorytmach i metodach nienadzorowanych, które możemy określić jako bazujące na modelach opracowanych na podstawie wiedzy eksperckiej, a które nie wymagają dostępności wielkich zbiorów poetykietowanych danych. Oczywiście ciągły brak tego typu zbiorów danych w pewnym stopniu uniemożliwia zastosowanie nowoczesnych metod z grupy AI, takich jak głębokie sieci neuronowe, czy też transformery wizyjne. Tym niemniej, trwają ciągle prace i obserwujemy dynamiczny rozwój zarówno w opracowaniu baz danych, jak i metod AI. W tym kontekście opracowane przez Pana mgr inż. Marka Sochę i przedstawione w rozprawie metody i algorytmy mogą być istotnym uzupełnieniem. W rozprawie można wyróżnić następujące cztery dominujące tematy badawcze Doktoranta.

1. Segmentacja płuc

Problem segmentacji płuc w sygnałach CT polega głównie na wyodrębnieniu zobrazowanych obszarów, które w rzeczywistości są obrazami płuc. Jednakże ze względu na wiele aspektów zarówno fizycznych, jak i obliczeniowych problem ten jest trudny i ciągle należy do problemów otwartych. Jedną z przeszkód jest już wspomniany brak odpowiednio licznych i odpowiednio dobrze poetykietowanych zbiorów danych.

W tym kontekście Autor przetestował i zbadał działanie metody bazującej na progowaniu (ang. *thresholding*), dodatkowo z kontrolą rozrostu obszarów do wyraźnych konturów, jak również metody opartej na sieci neuronowej typu U-Net. Doktorant doszedł do wniosku, że tradycyjne metody nie wykazują tutaj odpowiedniej dokładności, podczas gdy sieć U-Net dobrze radzi sobie z segmentacją płuc, a szczególnie wtedy gdy oryginalna sieć U-Net jest trenowana na odpowiednio zróżnicowanym zbiorze danych.

Nie jest to jednak odkrycie przełomowe Autora, a wręcz wpisuje się w rewolucję technologiczną spowodowaną opracowaniem już około 10 lat temu skutecznych sieci głębokich, jak również dostępnością systemów komputerowych o odpowiednich mocach obliczeniowych – szczególnie w postaci kart graficznych (GPU).

W przedstawionych pracach Doktoranta brakuje mi nieco szerszego spojrzenia i przebadania licznych wariantów sieci U-Net. Niewątpliwie cenna byłaby też niezależna ocena metody przez eksperta lekarza pulmonologa. W pracy brakuje jednak informacji czy Autor podjął takie próby.

Tym niemniej, należy tutaj wspomnieć, że ten kierunek badań, związany z analizą głębokich sieci neuronowych typu U-Net był kontynuowany przez Doktoranta, a wyniki zostały opublikowane w publikacji wieloautorskiej, którą analizuję w kolejnej sekcji recenzji.

2. Segmentacja dróg oskrzelowych

Segmentacja dróg oskrzelowych z obrazów CT płuc, ma na celu przede wszystkim ułatwienie dalszej analizy poprzez usunięcie obszarów o jednostkach Hounsfielda zbliżonych do tych znajdujących się w zmianach rozedmowych. Drugim celem jest umożliwienie analizy grubości ścian dróg oskrzelowych. Badania małych dróg oddechowych są bardzo istotne, gdyż zmiany chorobowe w tym obszarze mogą objawiać się stosunkowo wcześnie nawet u młodych palaczy, co znacząco wpływa na postęp POChP. Jak wykazano, istnieje związek między zapaleniem dróg oddechowych a rozedmą płuc. Stąd też istotne są badania służące w celu ich wykrycia.

W celu segmentacji Autor zauważył i wykorzystał tubularną strukturę dróg oddechowych oraz charakterystyczną intensywność otaczających ścian tkanek. Następnie zaproponował metodę segmentacji dróg oddechowych na obrazach tomografii komputerowej. W pierwszym kroku metoda ta zakłada wygenerowanie masek śródpiersia i tchawicy. Następnie Pan mgr inż. Marek Socha zaproponował użycie metody mikstur gaussowskich GMM (ang. *Gaussian mixture models* – GMM) do identyfikacji obszarów tłumienia. Dalej, do tego typu segmentacji Pan mgr inż. Marek Socha zaproponował tzw. algorytm szybkiego podążania (ang. *fast marching*, FM) z mapami podwójnego gradientu. Algorytm ten wykorzystuje dwa wygenerowane obrazy prędkości i punkty początkowe do identyfikacji dróg oddechowych. Kolejne kroki służą do dalszej poprawy segmentacji poprzez wyznaczenie ścian dróg oddechowych i identyfikację końcowych gałęzi za pomocą operacji morfologicznych.

Mimo iż jest to złożenie metod dobrze znanych od wielu lat i często używanych nawet przed nadejściem metod uczenia głębokiego, ich połączenie i wykorzystanie do sprawnej segmentacji tego typu trudnych do przetwarzania sygnałów CT oceniam jako interesujące i mające znamiona nowatorskich.

Dodatkowo, automatyczna procedura zaproponowana przez Pana mgr inż. Marka Sochę wykorzystuje szereg filtrów, takich jak filtr naczyńowy Sato bazujący na Hesjanie. Jego rolą jest ekspozycja struktur tubularnych dróg oskrzelowych. Do oceny jakości segmentacji Autor zaproponował nienadzorowaną metodę opartą na wartościach odstających statystyk Huberta. W tym podejściu segmentacja dróg oskrzelowych zostaje sklasyfikowana jako: prawidłowa, wystarczająca lub wadliwa. Pan mgr inż. Marek Socha znalazł, że prawidłowa jakość segmentacji z oceną „5” stanowi 55,22% obrazów, przy wystarczającej jakości na poziomie 32,92% łącznie dla ocen „4” i „6”. Autor zauważa jednakże, że pomimo skuteczności tej metody we wstępnym przetwarzaniu obrazów CT w celu wykrycia zmian rozedmowych i modelowania oskrzeli, metoda ta napotyka problemy z dokładnym określeniem końcowych gałęzi sąsiadujących z miąższem płucnym ze względu na podobne wartości jednostek Hounsfielda. Dlatego też metoda ta wymaga dalszych badań w celu jej udoskonalenia. Tym niemniej, ponieważ metoda ta zwraca maskę ściany oskrzeli wraz z segmentacją dróg oddechowych, ma ona potencjał w diagnostyce dróg oddechowych, szczególnie w problemie POChP.

Kolejny raz brakuje mi tu jednak rzetelnego przetestowania tej wersji metody. W przypadku braku odpowiednich danych referencyjnych byłoby to możliwe choćby poprzez konsultacje z ekspertami

w dziedzinie pulmonologii. W pracy brak jednak jakichkolwiek odwołań do tego typu analiz z ekspertami. Uważam, że jest to duża niedoskonałość natury metodologicznej.

3. Segmentacja wzorów niskiego tłumienia

Mimo znacznego postępu w diagnozowaniu medycznym oraz mimo istnienia wielu bardzo efektywnych algorytmów tzw. uczenia głębokiego, segmentacja zmian rozedmowych napotyka liczne trudności, z których główną – jak pisze Pan mgr inż. Marek Socha w swojej rozprawie – jest ciągły brak odpowiednio dużych, a jednocześnie zdywersyfikowanych i odpowiednio opisanych baz danych, która mogłaby posłużyć do wytrenowania algorytmów opartych o uczenie głębokie. Dlatego też konieczne jest łączenie metod nienadzorowanych, w których wykorzystuje się tzw. algorytmy „tradycyjne”, czyli opracowane jeszcze przed nadejściem metod bazujących wyłącznie na uczeniu modelu na podstawie danych.

Wyżej wymienione problemy z dostępnością danych, ale również spostrzeżenia Autora, że zmiany rozedmowe charakteryzują się niejednorodnością pozycji oraz wielkości, ale są relatywnie jednorodne w poziomach szarości, nakierowały go na naturalną ścieżkę prób opracowania metod progowania obrazów. W tym celu Pan mgr inż. Marek Socha zaproponował adaptacyjne techniki progowania, w których wartość progowa nie jest stała lecz zależy od wartości sygnału obrazu i często innych jego parametrów. Doktorant zaproponował tu progowanie za pomocą mikstur gaussowskich, z jednoczesnymi warunkami prowadzącymi do unikania wartości niskiej atenuacji, które są charakterystyczne dla zmian rozedmowych. Następnie Autor przebadął dwie metody, (i) Approximate Threshold Estimation (ATE) oraz (ii) Exact Threshold Estimation (ETE). Obie wykorzystują GMM do wyznaczenia progów segmentacji, jednakże różnią się sposobami grupowania obszarów podobnych. I tak, ATE grupuje komponenty gaussowskie po dekompozycji GMM, natomiast ETE dokonuje grupowania na podstawie progów uzyskanych w późniejszym etapie.

Metody zostały przetestowane przez Doktoranta na skanach CT płuc po wcześniejszym usunięciu drzewa oskrzelowego. Używając Bayesowskiego Kryterium Informacyjnego (BIC) do optymalizacji liczby klastrów, Autor dostosował działanie dekompozycji GMM poprzez precyzyjne określanie progów odcięcia. Różnice w wartościach progowych rozedmy płuc między metodami ATE i ETE zostały przetestowane za pomocą wybranych testów statystycznych. W ten sposób Doktorant wykazał, że metoda ETE ma tendencję do zaniżania obszaru segmentacji w porównaniu z ATE. Z kolei metoda ATE została uznana za bardziej skuteczną ze względu na jej spójność w zakresie progowania i segmentacji. Nasuwa się tu naturalne pytanie, czy możliwe byłoby połączenie tych dwóch metod w taki sposób żeby niwelowały swoje braki, prowadząc do być może lepszych wyników?

Ponadto, proces segmentacji objętościowej analizowano w różnych grupach POChP w ramach grupy GOLD. W tym eksperymencie, ATE wykazała wyższy wskaźnik klinicznie istotnych segmentacji. Tym niemniej, obie metody były zgodne z oczekiwanymi trendami w zakresie objętości zmian. Analiza sugeruje, że ATE jest lepsza do segmentacji zmian rozedmowych ze względu na niższe wartości progowe i wyższą czułość.

Wyniki podkreślają potencjał obu metod do automatycznej, nienadzorowanej segmentacji zmian wykraczających poza rozedmę płuc, z przewagą ATE w zastosowaniu do problemu wychwytywania zmian rozedmowych.

Skoro brakuje danych, to szkoda że Autor nie poświęcił nieco więcej uwagi możliwości otrzymania tego typu danych w sposób syntetyczny, np. przez wykorzystanie odpowiednich metod augmentacji danych, czy też sieci typu GAN (ang. *generative adversarial networks*, GAN).

4. Kwantyfikacja i grupowanie

Jak zauważa Pan mgr inż. Marek Socha w swojej rozprawie, w przypadkach istotnego zniszczenia uszkodzenia miąższu płucnego, np. w wyniku infekcji COVID 19, tradycyjne metody bazujące na spirometrii, czy też obliczeniach objętości okazują się niewystarczające do uchwycenia rzeczywistego zakresu i rodzaju zniszczeń w tkance płucnej. Dlatego ciągle bardzo istotne jest opracowanie skutecznych metod do automatycznej klasyfikacji i określania stopnia zaawansowania POChP. Dotychczas do tego celu wykorzystuje się zbiory danych, takie jak ECLIPSE oraz COPDGene.

W celu odpowiedniej kwantyfikacji wyników segmentacji z poprzednich analiz Doktorant użył mapowania cech regionów zainteresowania (ROI) w przestrzeni 2D, oferując wizualne porównanie z wynikami spirometrii w tzw. standardzie GOLD. Zaproponowana przez Autora metoda nie zastępuje podejmowania decyzji przez lekarza, ale może przyczynić się do ułatwienia diagnozy ze względu na zwiększenie stopnia zrozumienia poprzez przedstawienie relacji między przypadkami w przestrzeni 2D. Należy tu wspomnieć, że wytłumaczalność wyników nowoczesnych komputerowych metod klasyfikacji (ang. *ML explainability*) ma wielkie znaczenie w wielu dziedzinach, z których medycyna jest wiodącą.

Doktorant zaproponował tu rozdzielenie zmian rozedmowych na w pełni połączone obszary, które proponuje wyznaczać za pomocą stosunkowo dobrze znanej metody klasteryzacji typu k-means. Otrzymuje się w ten sposób powiązane ze sobą obszary w sygnale CT, na podstawie których Autor proponuje wyodrębnienie 3 zestawów cech, takich jak: (i) cechy radiomiczne, (ii) cechy oparte na konturach oraz (iii) cechy położenia przestrzennego – łącznie Doktorant proponuje 156 wartości na każdy obszar zainteresowania. Cechy te Autor poddał selekcji i osadzeniu przy pomocy metody UMAP (ang. *Uniform Manifold Approximation and Projection* - UMAP). Jest to stosunkowo nowa metoda redukcji wymiarowości danych za pomocą uczenia z wykorzystaniem różniczkowych bazując na geometrii przestrzeni Riemanna oraz topologii algebraicznej. Wizualizacja map gęstości UMAP ujawniła klastry odpowiadające różnym klasyfikacjom GOLD choroby POChP. Jak wykazał Doktorant, klastry dla różnych grup GOLD ukazują różne charakterystyczne wzorce rozedmy płuc, z pewnym nakładaniem się klastrów dla grup GOLD 0, 1 i 2. Przy pomocy w pełni połączonej sieci neuronowej utworzono model zdolny do transformacji punktów na przestrzeń UMAP, na podstawie którego określono wagę poszczególnych cech radiomicznych metodą wartości SHAP (*SHapley Additive exPlanations*) mającej swoje korzenie w teorii gier. Ponadto, do cech istotnie wpływających na osadzenie UMAP Doktorant zaklasyfikował cechy takie jak entropia przebiegu i długość mniejszej osi ROI. Dzięki takiemu podejściu, cechy te pomagają odróżnić przypadki z rozedmą od przypadków bez rozedmy. Metoda ta ma więc potencjał do wykorzystania podczas badań wykonywanych przez specjalistę, gdyż umożliwia lepszy wgląd w heterogeniczny charakter postępu przewlekłej obturacyjnej choroby płuc.

Niestety, mimo iż metoda ta jest ciekawa i z potencjalnie dużym polem zastosowań, Doktorant nie dość dokładnie wybrał architektury oraz sposób trenowania użytej sieci neuronowej. Podobnie jak w poprzednich przypadkach, brak jest też informacji czy Autor chociażby konsultował sposób działania oraz potencjalne zastosowania ze specjalistami pulmonologami. Są to dość istotne uchybienia ewaluacyjne proponowanej metody.

Jeden z głównych wniosków, który nasuwa się po analizie możliwych rozwiązań w zagadnieniu badawczym podjętym przez Pana mgr inż. Marka Sochę to istotny wpływ braku poetykietowanych baz danych, które – gdyby były dostępne w znaczącej liczbie – umożliwiłyby trenowanie nowoczesnych algorytmów AI, takich jak sieci głębokie czy też transformery wizyjne. Dlatego wiele metod, w tym i te Autora, ogranicza się do podejść bardziej tradycyjnych, np. bazujących na stosunkowo prostym progowaniu sygnału w celu segmentacji. W celu poprawy tej sytuacji potrzebne jest więc zarówno tworzenie nowych zbiorów danych, ale również sięgnięcie po metody być może starsze lecz nie wymagające tak dużych zbiorów danych, takie jak zaproponował Doktorant.

Tym niemniej, wszystkie wymienione zagadnienia badawcze, jak i ich oryginalne rozwiązania naukowe zaproponowane przez Pana mgr inż. Marka Sochę świadczą o dużej wiedzy i dojrzałości naukowej. Świadczą one również o znajomości istotnych osiągnięć i technologii światowych.

3. Wiedza Kandydata

Które z rozdziałów (lub sekcji w rozdziałach) rozprawy omawiają istniejący stan wiedzy i dzięki temu potwierdzają ogólny stan wiedzy kandydata w zakresie ITT? Jakie obszary tych dyscyplin zostały omówione w tych rozdziałach/sekcjach? Jaka jest opinia recenzenta o jakości tych rozdziałów/sekcji? Jaka jest opinia recenzenta o bibliografii? Na ile bibliografia jest kompletna? Prosimy o podanie innych argumentów za lub przeciw stwierdzeniu, że kandydat posiada ogólną wiedzę w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Marka Sochy jest dość obszerna i liczy 138 strony. Jest napisana po angielsku i składa się z 9 rozdziałów oraz obszernej bibliografii. Struktura tej rozprawy wygląda następująco:

1. *Introduction* – w rozdziale tym, oprócz informacji wstępnych dotyczących tematyki i organizacji rozprawy, Pan mgr inż. Marek Socha zamieścił tezy rozprawy.
2. *Technical background* – ciekawy aczkolwiek niepełny rozdział, w którym Autor opisał urządzenia służące do przeprowadzania badań tomografii komputerowej (CT).
3. *Biological background* – to bardzo istotny rozdział, w którym Pan mgr inż. Marek Socha opisuje podstawy biologiczne badań płuc i ogólnie układu oddechowego człowieka. Rozdział ten może być bardzo cenny, szczególnie dla osób nie związanych zawodowo z medycyną. Doktorant wykazał się przy tym sporą erudycją i jestem pod wrażeniem wszechstronności wiedzy Doktoranta.
4. *Materials* – jest to stosunkowo krótki rozdział, w którym jako „materiały” badawcze Autor przedstawia dostępne bazy danych dotyczące badania płuc za pomocą CT.
5. *Lung and lobes segmentation* – w tym rozdziale Doktorant przedstawia metody segmentacji płuc. Autor koncentruje się na przedstawieniu stanu wiedzy (*state-of-the-art*), a następnie dyskutuje możliwości użycia „standardowej” wersji bardzo dobrze znanej sieci segmentacyjnej typu U-Net. Na końcu przedstawione są wyniki eksperymentów wraz z ich krótką analizą.
6. *Airways* – rozdział ten dotyczy metod segmentacji dróg oddechowych. Pierwszym etapem przetwarzania obrazów jest wyizolowanie dróg oddechowych, po czym następuje analiza obszarów dróg oddechowych. Główna metoda segmentacji dróg oddechowych wykorzystuje trzy kluczowe cechy dróg oddechowych: (i) ich strukturę rurową, (ii) charakterystyczne natężenia wokseli i ich wypełnienia, oraz (iii) to że drogi oddechowe są otoczone ścianami

tkanki litej. W oparciu o te właściwości, Autor proponuje metodę opierającą się na algorytmie tzw. szybkiego podążania w mapie oparte o drugą pochodną lokalną z sygnału obrazu, przy warunku ograniczającym przez szacowane ściany dróg oddechowych. Opisane zostały eksperymenty wraz z dyskusją wyników.

7. *Low attenuation patterns* – Autor przedstawia metody segmentacji obrazów o słabej jakości powstających w badaniu tomografii komputerowej klatki piersiowej. Podstawą przedstawionej metody segmentacji jest znalezienie i oznaczenie wokseli określonych obszarów miększego płucnego dotkniętych zmianami rozedmowymi. Dodatkowo istotny jest podział zainfekowanych obszarów na podregiony na podstawie ich łączności i położenia. Zaproponowane przez Pana mgr inż. Marka Sochę metody opierają się na progowaniu adaptacyjnym i istotnej przesłance, że zdrowe struktury widoczne na tomografii komputerowej płuc, o wartości zbliżonej do poszukiwanych obszarów, są usuwane przed rozpoczęciem metody. Analiza skanów tomografii komputerowej jest przeprowadzana dla każdego przekroju, dla którego tworzone są modele mieszaniny Gaussa. Z kolei na ich przecięciach wyznaczane są progi odcięcia definiujące oddzielne klastry. Ponieważ niskie wartości tłumienia charakteryzują zmiany rozedmowe, pierwszy klaster zawiera woksele uważane za zmiany rozedmowe. W ramach pojedynczej serii tomografii komputerowej zmiany są dalej grupowane na podstawie ich lokalizacji i stopnia łączności. Autor przedstawił eksperymenty oraz rezultaty metody wskazujące na jej zadawalające działanie w warunkach rzeczywistych danych.
8. *Quantification and mapping* – rozdział ten poświęcony jest kwantyfikacji zmian rozedmowych. Pan mgr inż. Marek Socha przedstawia tu autorską metodę kwantyfikacji rozedmy płuc. Głównym celem tej kwantyfikacji jest podsumowanie wyników, czyli nieprawidłowych zmian w płucach. Otrzymywany format, który działa poprzez wykorzystanie wcześniej opracowanych wyników segmentacji, umożliwia szybkie wyciąganie wniosków. Podejście to polega na wyodrębnieniu cech z obszaru zainteresowania (ROI) i ich rzutowanie do przestrzeni 2D. Umożliwia to zilustrowanie różnic, ale i podobieństw między pacjentami. Zaproponowaną technikę kwantyfikacji Pan mgr inż. Marek Socha porównuje z wartością GOLD standard, uzyskaną z wyników spirometrii. Podobnie jak poprzednie, i ten rozdział kończy się szczegółowym opisem eksperymentów oraz dyskusją otrzymanych wyników.
9. *Summary* – rozdział podsumowuje rozprawę. Pan mgr inż. Marek Socha dokonał tu syntetycznego opisu głównych metod, jak również potencjalne kierunki dalszego rozwoju.
10. *Bibliography* – bardzo obszerna bibliografia zawierająca 233 pozycje literaturowe. Zasługuje ona na podkreślenie i świadczy o dużej erudycji naukowej Autora. Pośrednio jest też wynikiem wielo-dyscyplinarności podejmowanych tematów naukowych. Jedynie lekkie zdumienie budzi fakt braku w tym spisie prac autorstwa samego Pana mgr inż. Marka Sochy.

Skoro Pan mgr inż. Marek Socha nie wymienił w rozprawie wprost swoich publikacji, dlatego poniżej przedstawiam syntetyczny opis głównych z nich, jak również przedstawiam tzw. parametry bibliometryczne Doktoranta. Pan mgr inż. Marek Socha jest współautorem kilku artykułów naukowych. Te związane tematycznie z rozprawą doktorską przedstawiają się następująco:

1. **Marek Socha**, et al.: *Pathological changes or technical artefacts? The problem of the heterogenous databases in COVID-19 CXR image analysis*. Computer Methods and Programs in Biomedicine, Elsevier, 2023 – 23 autorska praca, Pan mgr inż. Marek Socha jest pierwszym autorem; IF=4,8, punkty: 100.

W artykule przedstawiono zbiór danych POLCOVID, zawierający zdjęcia rentgenowskie klatki piersiowej (CXR) pacjentów z COVID-19 lub innym typem zapalenia płuc oraz osób zdrowych zebrane z 15 polskich szpitali. Do oryginalnych zdjęć rentgenowskich dołączono wstępnie

przetworzone obrazy ograniczone do obszaru płuc oraz odpowiadające im maski płucne uzyskane za pomocą modelu segmentacji.

2. Aleksandra Suwalska, Joanna Tobiasz, Wojciech Prazuch, **Marek Socha**, et al.: *POLCOVID: a multicenter multiclass chest X-ray database (Poland, 2020–2021)*, Scientific data, Nature, 2023. – 22 autorska, Pan mgr inż. Marek Socha na czwartym miejscu; IF=6,9, punkty: 140.
Artykuł dotyczy jednego z obszarów badań naukowych związanych z diagnostyką COVID-19, którym było obrazowanie medyczne, jak również jego potencjał w zakresie wspierania testów molekularnych. Niestety, kilka systemów wykazało problem słabej generalizacji metod bazujących na algorytmach sztucznej inteligencji. Autorzy odkryli wiele przyczyn tego problemu i postanowili nazwać je czynnikami zakłócającymi, czyli zbiorem artefaktów i błędów metodologicznych związanych z daną metodą. Celem było zbadanie przyczyn tego zjawiska, jak również możliwości polepszenia wyników na danych rzeczywistych. Jako główną przyczynę, jak również możliwość poprawy autorzy podają dostosowanie odpowiedniego poziomu rozdzielczości danych użytych do uczenia algorytmów AI.
3. Wojciech Prazuch, Aleksandra Suwalska, **Marek Socha** et al.: *CIRCA: comprehensible online system in support of chest X-rays-based COVID-19 diagnosis*; arXiv preprint arXiv:2210.05440, 2022 – 22 autorów.
4. Joanna Żyła, Michał Marczyk, Wojciech Prazuch, **Marek Socha** et al.: *Combining low-dose CT-based radiomics and metabolomics for early lung cancer screening support*; arXiv preprint arXiv:2311.12810, 2023 – 12 autorów.
5. Wojciech Prazuch, **Marek Socha** et al.: *BRONCO: Automated modelling of the bronchovascular bundle using the Computed Tomography Images*; arXiv preprint arXiv:2309.09410, 2023 – 12 autorów.

Publikacja w postaci monografii naukowej:

6. **Marek Socha**, Aleksandra Suwalska, Wojciech Prazuch, Michał Marczyk, Joanna Polanska: *UMAP-based graphic representation of Polcovid chest X-ray data set heterogeneity*. Książka Recent advances in computational oncology and personalized medicine, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2021.

Z pozostałych artykułów warto wyróżnić następujące:

7. Michał Marczyk, Aleksander Kempski, **Marek Socha**, et al.: *Passenger location estimation in public transport: Evaluating methods and camera placement impact*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024 – IF= 9.966, punkty: 140.

Prace współautorskie Pana mgr inż. Marka Sochy zostały już zauważone w międzynarodowym środowisku naukowym, co przyczyniło się do kilku cytowań, jak również spowodowało zwiększenie tzw. współczynnika Hirscha. Parametry te w dwóch bazach danych przedstawiam poniżej.

	Google Scholar	Web of Science
Liczba publikacji	8	4
Liczba cytowań	19	9
h-index	3	2

Zarówno liczba, jak i wartość merytoryczna wyżej wymienionych publikacji, w których Pan mgr inż. Marek Socha jest współautorem, jest w mojej ocenie wystarczająca dla kandydata do stopnia doktora w dyscyplinie ITT. Również wartości cytowań są już zauważalne, a uwzględniając zaangażowanie Doktoranta w badania naukowe, przypuszczam że wartości te ulegną pozytywnemu szybkiemu wzrostowi.

Podsumowując, wiedzę Kandydata w zakresie prezentowanym w rozprawie doktorskiej oceniam pozytywnie.

4. Poprawność naukowa

Czy stwierdzenia zawarte w rozprawie są godne zaufania? Czy uzasadnienia są poprawne? Wskaż zauważone słabości i błędy. Wskaż także te aspekty dotyczące poprawności, które są najbardziej wartościowe.

Pan mgr inż. Marek Socha podjął uzasadnioną naukowo metodykę prowadzenia badań polegającą na zaobserwowaniu i sformułowaniu problemów, analizie istniejących metod i algorytmów, a następnie na proponowaniu nowych, Jego zdaniem lepszych rozwiązań. Tym niemniej, **główny mankament który zaobserwowałem i opisałem w poprzedniej sekcji dotyczącej osiągnięć Autora to, moim zdaniem, zbyt mała dbałość o prawidłowe i kompleksowe oszacowanie dokładności odpowiedzi zaproponowanych metod.** Wiele ocen robi wrażenie powierzchownych bez porównania się z innymi metodami, czy też odwołaniem do oceny ekspertów pulmonologów. W rozdz. 6.3.8 Autor napisał „*The proposed method is unsupervised, making it difficult to evaluate the quality of the results. Therefore an unsupervised method for faulty segmentation detection was proposed based on the Hubert outliers*”. To jest jakiś pomysł, ale pierwszoplanowe rozwiązanie, które nasuwa się od razu i automatycznie **to zatrudnienie ekspertów lekarzy, którzy mogliby ocenić działanie tej metody z wykorzystaniem rzeczywistych przypadków.** W kolejnych krokach można wykorzystać metody testów statystycznych, detekcji wartości odstających itd. Należy przy tym pamiętać, że w przypadku metod nadzorowanych, to właśnie też bazujemy na danych wcześniej opisanych przez specjalistów z danej dziedziny, w tym przypadku pulmonologii! Więc w każdym przypadku rola ekspertów-specjalistów w dziedzinie jest niezbędna i nie do przecenienia. Zdając sobie sprawę z trudności w dostępie do specjalistów, jednak brakuje mi takiego podejścia w pracach Doktoranta.

Niekorzystny jest też fakt braku publikacji którejkolwiek z metod zaprezentowanych przez Pana mgr inż. Marka Sochę w istotnych periodykach naukowych. Nie wiem czy Pan mgr inż. Marek Socha próbował publikować, czy też nie (analizę publikacji Doktoranta przedstawiłem w poprzedniej sekcji), ale charakter tych propozycji, w których wykorzystano wyłącznie klasyczne i dobrze znane podejścia do analizy obrazów być może też nie spotka się z akceptacją ze strony środowiska naukowego.

Nie oznacza to, że użycie starszych, czy też prostszych metod jest złe, czy też nieprawidłowe, ale nieprawidłowe jest nie uwzględnienie postępu i wręcz rewolucyjnego wpływu metod nowszych, mam tu na myśli metody oparte o tzw. uczenie głębokie. Dlatego propozycje Pana mgr inż. Marka Sochy powinny być dobrze skonfrontowane z metodami już zaprezentowanymi i dobrze uznanymi w środowisku naukowym, np. takimi jak grafowe sieci neuronowe. Co więcej Pan mgr inż. Marek Socha jest świadom tych publikacji i je przytacza w bibliografii, ale na tym porównanie się kończy. Powoływanie się w tym względzie np. na pracę M. DeCampa et al. nie jest usprawiedliwieniem, gdyż ci autorzy wyrażają tylko pewną troskę w odniesieniu do traktowania nowoczesnych metod AI jako „czarnych skrzynek” o dużej sprawności i sprzeciwiają się bezkrytycznemu zastąpieniu takim

podjęciem dobrze wykształconego, empatycznego i znającego najnowsze techniki lekarza specjalisty. To dopiero połączenie tych wszystkich czynników wydaje się być prawidłowym podejściem do całościowego spojrzenia na problem osoby chorej w celu zaproponowanie najskuteczniejszych metod diagnostyki i leczenia. Często będą to nowsze lub najnowsze metody obrazowania, farmaceutyki, ale i właśnie metody ML/AI. Przykładem takiego podejścia jest nowoczesna histopatologia, w której lekarze specjaliści wspomagają się dużymi bazami skanów histopatologicznych, ale również długoletnimi studiami przypadków i wieloletnim doświadczeniem.

Kolejne miejsca i stwierdzenia w pracy, które wymagają dodatkowego wyjaśnienia, czy też rozszerzenia oraz dyskusji są następujące:

1. W rozprawie brakuje głębszego przeglądu nowoczesnych metod bazujących na uczeniu głębokim. Autor nieco unika tego tematu. To, że – jak pisze Doktorant – brakuje danych, nie znaczy że w tej dziedzinie nic nowego i istotnego nie powstaje. Jest wręcz przeciwnie. Zwróciłbym tutaj uwagę Doktoranta na poniższe artykuły, jak również inne prace, do których odwołują się autorzy tych artykułów.
 - R. Du et al., *"Identification of COPD From Multi-View Snapshots of 3D Lung Airway Tree via Deep CNN"*, IEEE Access, vol. 8, pp. 38907-38919, 2020.
(Wykorzystanie CNN do oceny trójwymiarowego drzewa dróg oddechowych płuc; modele identyfikujące POChP. Po wyodrębnieniu drzew dróg oddechowych CT, uzyskuje się migawki ich trójwymiarowych wizualizacji w widokach brzusznych, grzbietowych i izometrycznych.)
 - Li Z, Huang K, Liu L, Zhang Z. *"Early detection of COPD based on graph convolutional network and small and weakly labeled data"*. Med. Biol. Eng. Comput. 2022 Aug; 60(8):2321-2333.
(Wykorzystuje małe i słabo oznakowane dane obrazowe tomografii komputerowej klatki piersiowej z publicznie dostępnej bazy danych Duńskiego Badania Przesiewowego Raka Płuc)
 - Cai, Guang-Wei, Yun-Bi Liu, Qian-Jin Feng, Rui-Hong Liang, Qing-Si Zeng, Yu Deng, and Wei Yang. 2023. *"Semi-Supervised Segmentation of Interstitial Lung Disease Patterns from CT Images via Self-Training with Selective Re-Training"* Bioengineering 10, no. 7: 830.
(Półnadzorowane uczenie do segmentacji wzorców ILD z obrazów CT poprzez samouczenie z selektywnym ponownym trenowaniem.)
 - Sadish Sendil Murugaraj, et al.: *"Lung vessel segmentation and abnormality classification based on hybrid mobile-Lenet using CT image"*, Biomedical Signal Processing and Control, Volume 100, Part A, 2025.
(HM-LeNet model do segmentacji naczyń płucnych oraz klasyfikacji nieprawidłowości. Obrazy CT otrzymywane z bazy danych.)
 - Amer Alghadhiban, Rabie A. Ramadan, Meshari Alazmi: *"Advancing respiratory disease diagnosis: A deep learning and vision transformer-based approach with a novel X-ray dataset"*, Computers in Biology and Medicine, Volume 194, 2025.
(Szersze spojrzenie na badania układu oddechowego.)

Czy w pracach Doktoranta byłaby możliwość użycia którejs z baz danych, czy też metod z powyższych publikacji?
2. Wyjaśnienia wymaga pojęcie „niska atenuacja” użyta przez Doktoranta w polskich streszczeniach Jego metod („wykrywania zmian o niskiej atenuacji na obrazach TK klatki piersiowej”)? Niska atenuacja to sformułowanie, które może być nieco mylące, ponieważ termin atenuacja sam w sobie oznacza osłabienie, więc niska atenuacja oznaczałaby bardzo słabe osłabienie lub wręcz jego brak. Zazwyczaj jednak chodzi o wysoką atenuację (silne osłabienie) sygnału (np. promieniowania), a jeśli mówi się o niskiej atenuacji, może to oznaczać niewielki stopień osłabienia sygnału, np. w przypadku promieniowania przechodzącego przez tkanki o małej gęstości. W medycynie

i mikrobiologii, atenuacja to obniżenie zjadliwości patogenów – termin "niska atenuacja" oznaczałby więc, że drobnoustroje zostały osłabione w niewielkim stopniu, ale wciąż są zjadliwe i mogą wywołać chorobę. Z kolei, rzeczywiście w medycynie, a szczególnie diagnostyce atenuacja to osłabienie promieniowania podczas przechodzenia przez tkanki (np. rentgenowskiego). Niska atenuacja (małe osłabienie) występuje więc w tkankach o niskiej gęstości (np. w płucach), podczas gdy wysoka atenuacja (silne osłabienie) występuje w gęstszych tkankach (np. kościach). Termin ten i zjawisko wymaga doprecyzowania przez Doktoranta i wyjaśnienia.

3. Rozdział (2.8) *convolution kernel* – zupełnie nie rozumiem dlaczego Autor próbuje wyjaśnić akurat to pojęcie, podczas gdy np. w ogóle nie wspomina o transformacji Radona, która jest podstawą tomografii komputerowej.
4. Rozdział (3) jest bardzo szczegółowy, ale i wręcz eklektyczny; jednakże w kontekście badań nad chorobami płuc brakuje mi tutaj opisu skutków tak potężnej epidemii którą był COVID 19, a którą próbujemy jakby zapomnieć.
5. Rozdział (4.2) – w porównaniu z do opisu bazy COPDGene opis MOLTEST-BIS wydaje się być nieco ubogi; nie wiadomo czy i jak były te skany opisywane przez lekarzy, jakie informacje zawarły itd?
6. Str. 34 – Doktorant napisał: „*Finally, the performance of neural networks was evaluated using the network designed and trained by Hofmanninger et al. [135]*”. To co nowatorskiego wprowadził sam Doktorant, skoro w swojej rozprawie prezentuje wyniki p. Hofmanningera i zespołu? Ta sama informacja jest słowo w słowo powtórzona również na str. 36.
7. Rozdział 6 – Doktorant pisze: „*the method relies on the dual-gradient map fast marching algorithm, which is bounded by the estimated airway walls*”, ale zarówno metody gradientowe, jak i *fast marching* są dobrze znane od lat, to jaki jest oryginalny wkład Doktoranta?
8. W pracy Autor zamieścił wiele obrazów, ale nie podaje ich źródła pochodzenia – np. skąd pochodzą i przez kogo zostały wykonane obrazy z Figure 6.3, 6.5, ... i kolejne prezentowane w rozprawie?
9. Rozdział 6.4 – „*Most of the airway segmentations are of proper quality, that is, they belong to group 5, comprising 614 images, which represents 55.22% of the total set.*”, nie jest jasne jak Autor otrzymał te i kolejne wyniki prezentowane w tym rozdziale?
10. Rozdział 6.5 – „*A three-component Gaussian Mixture Model (GMM) method was developed for initial low and high attenuation patterns distinction.*”, czy obliczone parametry GMM są gdzieś dostępne i możliwe do użycia?
11. Rozdział 7.2 – Autor jako *state-of-the-art* odwołuje się do prac z 1997 roku (np. praca [186]), czy na pewno są to najnowsze i ciągle użyteczne prace w tej dziedzinie?
12. Str. 57 – Autor wspomina tu o pracy „Li et al. *Early detection of COPD based on graph convolutional network and small and weakly labeled data*” ([193]), w której do podobnych zagadnień wykorzystano głębokie sieci grafowe. Dlaczego Autor nie podążał tym kierunkiem i też tych lub innych sieci głębokich nie zweryfikował w swoich zagadnieniach? A jak wygląda SOTA w przypadku próby zastosowania transformerów wizyjnych?
13. Rozdział 7.3.2 – opis „*GMM decomposition*”, ale skoro Autor o GMM pisze już znacznie wcześniej, to czy nie byłoby wartościowe również zamieścić ten rozdział tam gdzie po raz pierwszy jest mowa o GMM?
14. Rozdział 7.3.7 – Pan mgr inż. Marek Socha przedstawia tu dwa algorytmy ATA oraz ETE, ale jaki jest Jego indywidualny wkład w opracowanie, implementację oraz zbadanie każdego z nich?
15. Str. 64 – Autor pisze o wykorzystaniu kilku testów statystycznych. Są one podane jeden za drugim, ale przecież różnią się one znacząco, choćby jedno są parametryczne, a kolejne nieparametryczne. To które były stosowane przez Doktoranta i do oceny których hipotez? Dlaczego te, jak Autor dobierał testy?

16. Str. 67 – Autor pisze: „*The Jarque-Bera test for normality indicated that the data significantly deviates from a normal distribution*”, to skoro tak to jaki miało to wpływ na zastosowanie GMM?
17. Str. 77 – „*For radiomic features calculation, the pyRadiomics package was used; it contains 7 feature groups amounting in total to 110 features.*”, to skoro do obliczania cech został użyty gotowy pakiet, to jaki jest oryginalny wkład Doktoranta w opracowanie tej metody? Brak jest też odwołania do prac prezentujących *pyRadomics*.
18. Str. 78 i kolejne – jaki jest sens opisywania kolejnych kroków metody PCA, znanej od przeszło stu lat i opisanej w dziesiątkach podręczników? Gdzie w rozprawie Autor wykorzystuje przedstawione tu wzory?
19. Rozdział 8.3.4 – Autor pisze o użyciu reprezentacji (embeddings) otrzymanych za pomocą UMAP. To jest oczywiście możliwe i ciekawe naukowo, ale skoro przed momentem liczone było PCA, to dlaczego nie użyć właśnie dominujących komponentów pochodzących z PCA? Jaka jest więc rola PCA w stosunku do UMAP?
20. Str. 87 – Doktorant informuje nas, że: „*The most influential features were distinguished by calculating SHAP values based on the trained neural network model*”, brak jednak szczegółowych informacji o wspomnianej sieci neuronowej, jak była trenowana itd.?
21. Rozdział 8.5 – Jaka jest oryginalna i nowa propozycja Doktoranta przy opracowaniu tych metod? Wygląda, że jest to połączenie dobrze znanych i dość leciwych metod wraz z analizą ich działania – nasuwa się więc pytanie, jak to się sprawdza w prawdziwym badaniu medycznym?

Spodziewam się, że Doktorant ustosunkuje się do powyższych pytań i dodatkowych zagadnień naukowych.

5. Podsumowanie

Tezy naukowe przedstawione w rozprawie doktorskiej Pana magistra inżyniera Marka Sochy zostały wykazane. Opracowane przez Doktoranta metody są uzasadnione dostępnością danych pomiarowych oraz bieżącym stanem wiedzy. Stanowią one oryginalny własny wkład Doktoranta Pana magistra inżyniera Marka Sochy w rozwój dyscypliny naukowej informatyka techniczna i telekomunikacja. Metody te mają duży potencjał aplikacyjny w diagnostyce układu oddechowego. Przy realizacji tych metod Pan magister inżynier Marek Socha wykazał się istotną znajomością zarówno aspektów medycznych badań stanu układu oddechowego za pomocą tomografii komputerowej, jak również współczesnych metod i algorytmów analizy danych, metod przetwarzania obrazów, algorytmów uczenia maszynowego oraz sztucznej inteligencji, jak również dobrym opanowaniem warsztatu badawczego, a w rezultacie również wysoką dojrzałością naukową.

Recenzowaną pracę oceniam jako z spełniającą formalne oraz zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wnioskuje o jej przyjęcie oraz o dopuszczenie Pana magistra inżyniera Marka Sochy do publicznej obrony.

