



Recenzja pracy doktorskiej przedłożonej
na Wydziale Budownictwa i Transportu Politechniki Śląskiej
w związku z ubieganiem się o tytuł doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport
z tytułowanej:

**"Prediction of the mechanical and electrical properties of cementitious composites using artificial
neural networks"**

Autor: MSc. CEng Sofija Kekez

Promotor: Prof. Jan Kubica, PhD, DSc. CEng.
Promotor pomocniczy: Dr. Marcin Górski, PhD, CEng.

Praca doktorska została przygotowana przez MSc. CEng Sofiję Kekez i przedłożona na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej w celu uzyskania tytułu doktora nauk technicznych. – Doktor nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport.
Podstawę prawną recenzji stanowi Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późniejszymi poprawkami).

Prezentowana recenzja podzielona została na siedem części:

- I) Sylwetka Kandydatki
- II) Ogólny opis pracy
- III) Tło projektu i jego cel
- IV) Ocena wykorzystanej literatury
- V) Szczegółowa ocena merytoryczna poszczególnych części pracy doktorskiej
- VI) Lista pytań
- VII) Ostateczny wniosek i oświadczenie podsumowujące

Sylwetka Kandydatki

Kandydatka mgr inż. Sofija Kekez ukończyła studia magisterskie na Wydziale Inżynierii Lądowej i Geodezji na Wydziale Nauk Technicznych Uniwersytetu w Nowym Sadzie w Serbii (2017). Zgodnie z przekazanymi informacjami, Kandydatka nie ubiegała się wcześniej o stopień doktora w kraju ani za granicą. Po ukończeniu studiów magisterskich, w 2018 roku Sofija Kekez otrzymała stypendium doktoranckie wspierane przez „SymIn” – Simulation in Engineering (Symulacje w Inżynierii), Interdyscyplinarne Studia Doktoranckie, Politechnika Śląska [numer projektu POWR.03.05.00-IP.08-00-PZ1/17].

Jest Autorką ośmiu i współautorką pięciu publikacji (w trzech jako pierwszy Autor). Swoje prace prezentowała na dziewięciu konferencjach, m.in.: Numerical Modelling Strategies for Sustainable Concrete Structures (SSCS 2022), Marseille, France; 6th International Conference on Structural Engineering and Concrete Technology (ICSECT 2021), June 2021, Lisbon, Portugal; 66. Konferencji Naukowej Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB, wrzesień 2020, Krynica.

Ogólny opis pracy

Rozprawa doktorska jest napisana w języku angielskim i składa się z 9 głównych rozdziałów. Zawiera 149 stron, spis symboli i skrótów, spis bibliograficzny tabel oraz obszerne załączniki liczące 138 stron. Rozpoczyna się wprowadzeniem do tematu, przedstawiającym tło i motywację badań. Rozdział II składa się z przeglądu literatury, a rozdział III zawiera tło teoretyczne oparte na 154 publikacjach. Po przeglądzie literatury następuje rozdział IV, prezentujący założenia i hipotezy. W rozdziale V przedstawiono opisane w literaturze eksperymenty i procedury badawcze. Rozdziały VI i VII wprowadzają czytelnika w analizy i symulacje numeryczne oraz modele sieci sztucznych, które zostały zastosowane przez Kandydatkę. Po tej części następuje rozdział VIII podsumowujący wyniki, a rozdział 9 wskazuje, na podstawie badań Kandydatki, kierunki przyszłych badawcze.

Rozprawa jest przygotowana z zachowaniem odpowiednich standardów redakcyjnych. Wszystkie rysunki są starannie przygotowane i przedstawione w tekście. Język pracy jest spójny, pomysły są przedstawione przejrzysto, a dokument łatwo się czyta.

Ocena wykorzystanej literatury.

Literatura wykorzystywana w rozprawie doktorskiej jest dobrana właściwie. Ponadto, jest urozmaicona i bogata. Na podkreślenie zasługuje umiejętność korzystania z najnowszej literatury przedmiotu oraz liczne odniesienia do najnowszych światowych badań w tej dziedzinie. Kandydatka wykorzystała 154 pozycje bibliografii naukowej. Najnowsze publikacje wydane w ciągu ostatnich 5-6 lat (od 2016 r.) stanowią 44% (68 pozycji) całej bibliografii, co przy obecnej wysokiej dynamice obiegu wiedzy w nauce jest wskaźnikiem zadowalającym.

Tło projektu i jego cel

W rozprawie doktorskiej Pani Sofija Kekez odnosi się do zagadnienia zastosowania nanomateriałów: nanorurek węglowych CNT i nanowłókien węglowych CNF w betonie. Głównymi zaletami takiego kompozytu są ulepszone właściwości mechaniczne i wyższa przewodność elektryczna. Beton o takich właściwościach zyskuje nowe potencjalne zastosowania i staje się wielofunkcyjny ze zdolnością samodetekcji. Zdolność samodetekcji może być istotna dla rozwoju systemów detekcyjnych i monitorowania strukturalnego. Ponieważ optymalna mieszanka betonu zbrojonego CNT lub CNF jest zwykle opracowywana w stosunkowo długim procesie prób i błędów. Pamiętając, że CNT i CNF są kosztownymi składnikami, Kandydatka bada zastosowanie symulacji numerycznych wykorzystujących sztuczne sieci neuronowe (ANN) do procesu projektowania materiałów i przewidywania właściwości. Głównym celem pracy jest zminimalizowanie stosowania czasochłonnych i kosztownych testów eksperymentalnych. Autorka ma nadzieję, że wprowadzając nowatorskie podejście do projektowania mieszanki betonowej i weryfikując jego potencjał w zakresie projektowania betonu ze zdolnością samodetekcji, stanie się on bardziej wykonalny i opłacalny. Ta procedura projektowa może zwiększyć zastosowanie tego rodzaju betonu w budownictwie. W niniejszej rozprawie przedstawiono nowatorskie metody przewidywania zachowania żelbetu CNT i CNF, w tym symulacje numeryczne materiału kompozytowego w ANSYS-ie oraz zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do przewidywania wytrzymałości na ściskanie, zginania i oporności elektrycznej materiału.

Szczegółowa ocena merytoryczna poszczególnych części rozprawy

Rozdział I wprowadza czytelnika w kontekst badawczy, motywację, metodologię i zarysy pracy. W tej części rozprawy Kandydatka wyraźnie przedstawia pięć celów rozprawy:

- 1/ Zestawienie kompleksowej kolekcji eksperymentów z nanorurek węglowych i betonu zbrojonego włóknem węglowym, z uwzględnieniem wszystkich możliwych czynników wpływających na końcowe właściwości materiału kompozytowego.
- 2/ Opracowanie modeli numerycznych i symulacja zebranych eksperymentów w celu ustalenia możliwej alternatywy dla tradycyjnych metod projektowania mieszanek betonowych.
- 3/ Ustalenie, czy modele numeryczne są w stanie naśladować proces wytwarzania betonu i jego badania.
- 4/ Opracowanie sztucznych sieci neuronowych do prognozowania wytrzymałości na ściskanie, zginania i objętościowej rezystywności elektrycznej cementowych materiałów kompozytowych z funkcją samodetekcji.
- 5/ Ustalenie optymalnego typu i architektury sztucznej sieci neuronowej dla tego typu problemu poprzez zróżnicowanie parametrów sieci.

Cele pracy oceniam jako dość ambitne; obejmują wybór prac eksperymentalnych, które dotyczą wytwarzania i badania cementowych materiałów kompozytowych z samodetekcją, dobór czynników wpływających na właściwości materiału. Ponadto, obejmują opracowanie modelu w ANSYS-ie oraz projektowanie, testowanie i kalibrację architektury sztucznych sieci neuronowych.

Dobór metodologii został odpowiednio przedstawiony i omówiony. Kandydatka wyjaśnia w **Rozdziale I**, że praca została podzielona na dwie główne części. Pierwsza część pracy polegała na zebraniu danych dotyczących procesów wytwarzania nanorurek węglowych i betonu z nanowłóknami węglowymi, w tym procesów dyspersji nanowypełniacza w osnowie, mieszania, formowania i utwardzania.

W drugiej części rozważane jest zastosowanie symulacji numerycznych do projektowania materiałów oraz badania zginania i ściskania próbek z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS jako alternatywy dla procedur eksperymentalnych. Materiały są projektowane, a eksperymenty są powielane w celu zaobserwowania możliwości wykorzystania tego oprogramowania. Uzyskane wyniki wyników symulacji są gromadzone i wykorzystywane do tworzenia sztucznych sieci neuronowych, przeznaczonych do przewidywania zachowania betonu.

Rozdział II zawiera przegląd literatury dotyczącej projektowania mieszanek betonowych i sztucznych sieci neuronowych. Opis metod projektowania przybliża metody analityczne, półeksperymentalne, metody eksperymentalne i statystyczne. Lektura tego tekstu pozostawia znaczny niedosyt, wynikający z braku przedstawienia podstawowej analitycznej metody projektowania, metody trzech równań, wraz z wyjaśnieniem jej zasad.

Ponadto należy zauważyć, że Kandydatka nie wspomina o metodach projektowania mieszanki betonowej, z którymi prawdopodobnie się zetknęła i poznała podczas pracy w polskim zespole badawczym. W Polsce najczęściej stosowanymi metodami projektowania składu betonu są wspomniana metoda trzech równań, metoda kolejnych przybliżeń (metoda Kuczyńskiego) oraz metoda dwustopniowej pokrywy żwirowej (metoda Paszkowskiego).

W rozdziale II Kandydatka wymienia i opisuje bardziej zaawansowane techniki, które są dedykowane do projektowania betonu samozagęszczalnego w oparciu o reologię oraz przytacza prace grupy badawczej wykorzystującej algorytmy genetyczne i modele uczenia ekstremalnego (ELM). W tym opracowaniu przewiduje się wykluczenie potrzeby pracy laboratoryjnej, bez potrzeby próbnego dozowania. Moim zdaniem jest to stwierdzenie zbyt optymistyczne. Dziś nie jest łatwo wyobrazić sobie wykonanie betonowego elementu konstrukcyjnego z tak zaprojektowanego betonu, wykonanego bezpośrednio w wytwórni betonu i wysłanego na miejsce bez próbnego zarobu...

Rozdział III jest w istocie kontynuacją oceny obecnego stanu wiedzy. Między innymi podrozdział 2.1 wydaje się być kontynuacją przedstawienia stanu techniki z rozdziału II, gdzie przedstawiono normy i metody projektowania mieszanek betonowych. Podobnie znajdujemy kontynuację przeglądu tego tematu w podrozdziale na temat sztucznych sieci neuronowych. Prezentacja stanu wiedzy na ten temat w dwóch miejscach może być dla czytelnika dezorientująca.

Moim zdaniem podsumowanie informacji z Podstaw elektroniki (właściwości elektrycznych) (rozd. II, 1) należy wprowadzić po podrozdziale o dotyczącym betonów zdolnych do samodetekcji. W podrozdziale 3 Beton o zdolnościach do samodetekcji Autorka wymieniła wypełniacze funkcjonalne, które okazały się skuteczne w zapewnianiu zdolności detekcyjnych: włókna węglowe lub stalowe, nanorurka węglowa, nanowłókno węglowe, sadza, nano-SiO₂, nano-TiO₂, nano-Fe₂O₃, proszek niklu, grafen lub połączenie (hybryda) kilku. Z jakich powodów Autorka ograniczyła się w tym badaniu do nanorurek węglowych i nanowłókien węglowych?

Wspominając, że „właściwości mechaniczne i inne właściwości nanorurek węglowych są znacznie lepsze w porównaniu z jakimkolwiek tradycyjnym materiałem budowlanym” przedstawiła Pani porównanie wytrzymałości betonu na rozciąganie i nanorurek węglowych, pokazujące potencjał nanorurek węglowych 11000-100 000 [MPa] do poprawy wytrzymałości betonu na rozciąganie o 2-5 [MPa]. Spodziewamy się, że w ślad za tymi rewelacjami pojawiają się informacje o zdolnościach wzmacniających nanorurek i nanowłókien na beton oraz przykłady pokazujące wpływ dodatku CNF/CMT na właściwości betonu. Porównując nanorurki i beton - przewodność cieplna 2000-6000 [W/m·K] vs 1,0-1,8 [W/m·K]; przewodność elektryczna [S/m] 102-106 w porównaniu z 10⁻⁸ oczekiwana poprawa zdolności samodetekcji takich kompozytów jest oczywista.

Niemniej jednak jednym z głównych mankamentów rozprawy jest brak w tej sekcji danych prezentujących wpływ nanododatku na właściwości betonu. W pracy nie znajdujemy wyczerpującego opisu przedstawiającego zależność pomiędzy ilością nanododatku, a podstawowymi właściwościami mechanicznymi i elektrycznymi betonu.

Podrozdział 3.3 rozdziału III wprowadza pojęcie progu perkolacji i krytycznego stężenia wypełniacza, aby osiągnąć ten próg. Napisano, że „(...) efektywne stężenie jest nie większe niż 1,5% dla wypełniacza włóknistego, natomiast dla wypełniacza cząsteczkowego co najmniej 5% (...)” – proszę podać, czy chodzi o masę czy objętość? Niestety, brak jest odniesień literaturowych do większości stwierdzeń przedstawionych w tym rozdziale.

W podrozdziale 3.4 podkreślono kwestię dyspersji nanonapełniaczy, ważnego aspektu, który może zagrażać jednorodności betonu i prowadzić do segregacji oraz silnie wpływać na właściwości detekcyjne betonu. W niniejszym rozdziale omówiono wpływ składników mieszanki betonowej na stosunek w/c, kruszywa gruboziarniste oraz dodatki mineralne. Podrozdział 3.5 Properties of self sensing concrete i 3.6 . Mechanizmy przewodzenia elektrycznego w self-sensing concrete. Ten dziesięciostronicowy podrozdział (od 3,4 do 3,6) oparty jest głównie na odnośniku do książki 67 ([67] Han, B., Xu X., Ou, J. Self-Sensing Concrete in Smart Struktury, 2014, Butterworth-Heinemann). Czy w tekście nie brakuje odniesień do oryginalnych źródeł informacji?

Podrozdziały: 3.6. Mechanizmy przewodnictwa elektrycznego w samoczujującym betonie i 3.7. Pomiar właściwości samodetekcyjnych betonu należy również przenieść do sekcji, w której omawiane są właściwości elektryczne.

W podrozdziale 4 przedstawiono symulacje numeryczne, które Kandydatka podjęła z wykorzystaniem MES (ANSYS) do analizy zachowania mechanicznego nanorurek węglowych CNT i nanowłókien węglowych betonów CNF (w rzeczywistości betonów kruszywowych – zapraw murarskich). Informacje przedstawione w tym podrozdziale w rzeczywistości należą do Rozdziału VI, Analiza numeryczna i symulacja.

W podrozdziale 5 opisano metodę sztucznej sieci neuronowej, rodzaje, poziomy warstw, sieci, sposób ekstrapolacji wyników oraz normalizację zbiorów danych.

Rozdział IV prezentuje założenia dotyczące danych zaczerpniętych z badań eksperymentalnych w 35 pracach wybranych do oceny przez Kandydatkę, a także postawioną hipotezę dotyczącą symulacji numerycznych. Bardzo pozytywnie oceniam krytyczną ocenę przez Kandydatkę przyjętych założeń oraz danych wejściowych i ograniczeń narzędzi wykorzystywanych do modelowania. Niemniej jednak większość hipotez przedstawionych na stronie 60 jest oczywista i wydaje się oczywista. Które z nich były Pani zdaniem najmniej oczywiste i najtrudniejsze do udowodnienia?

Tytuł **Rozdziału V** Badania eksperymentalne jest mylący. Można by oczekiwać, że w tej części zostaną przedstawione wyniki własnej pracy eksperymentalnej Kandydatki. Rozdział V przedstawia w rzeczywistości eksperymentalne programy prac badawczych dla każdego traktowanego źródła odniesienia. Obejmuje dyspersję nanododatku oraz procedury produkcyjne: w tym mieszanie, formowanie i utwardzanie. Ponadto przeanalizowano informacje o sposobie oceny jakości dyspersji nanododatku w matrycy. Poza ogólnym składem wybranych mieszanek brak jest informacji o proporcjach ilościowych składników. Ponadto w tabeli 5.3 nie podano informacji o ilości CNT i CNF. Czy te informacje nie były wymagane jako dane wejściowe do modelu?

W **rozdziale VI** przeprowadzono analizy i symulacje numeryczne z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS dla składów betonów z CNF i CNT zaczerpnięte z literatury.

Strona 79, Podrozdział 4 Wyniki - „(...) Można zauważyć, że zniszczenie nie wystąpiło w żadnej z próbek materiału kompozytowego. Potwierdza to również fakt, że moduł Younga i współczynnik Poissona wszystkich homogenizowanych materiałów kompozytowych znacznie wzrosły wraz z dodatkiem nanonapelnacza (...)”. Stwierdzenie to podważa wyniki badań numerycznych i może świadczyć o błędnie przyjętych założeniach. Moduł sprężystości materiału cementowego wyższy niż 50 GPa jest trudny do zaakceptowania nawet jako wynik liczbowy. Podobnie, wytrzymałość na rozciąganie 10 MPa, gdy przy ścisaniu wynosi 30 MPa. Wyniki te nie powinny być dalej przetwarzane, a dane wejściowe powinny zostać poddane krytycznej ocenie.

Strona 83 - „(...) Podobnie jak wyniki próby zginania, wyniki próby ścisania mało realistycznie przedstawiają sytuację” (...) Jeśli tak, to czy należy je przedstawić w rozprawie doktorskiej?

Strona 83 - Co Autorka ma na myśli, stwierdzając (...) *ang.* Liczby są podzielone na podobne mieszanki cementu, zaprawy i betonu (...)”.

Warto zauważyć, że Autorka podsumowując wyniki symulacji numerycznych krytycznie odnosi się do ich wartości.

Rozdział VII przedstawia opracowany i zoptymalizowany model sieci neuronowych. Przeprowadzono wyniki eksperymentalne i symulacje numeryczne oraz przeprowadzono analizę wrażliwości w celu ustalenia optymalnej procedury rozwoju sztucznej sieci neuronowej i jej architektury. Ze sposobu przedstawienia tego rozdziału można wywnioskować, że jest to specjalizacja Autorki. Swobodnie porusza się w tym temacie, prezentując następujące etapy procesu: uczenie sztucznych sieci neuronowych, walidację i proces testowania.

W **rozdziale VIII** podsumowano prace numeryczne i modelowanie SSN. Stwierdzono, że ANSYS Material Designer jest użytecznym narzędziem do badania właściwości betonów CNT lub CNF i wytrzymałości przy

niższych udziałach wagowych materiału nanododatku (udział wagowy do 0,1%). Dla ilości powyżej 0,1% model dał nierealistyczne wyniki pod względem wytrzymałości na zginanie i modułu Younga. Ponadto, wytrzymałość na ściskanie wykazała zmienność tych wartości (wzrost lub nawet spadek) dla wyższych frakcji wagowych, co nie pokrywa się z przedstawionymi wynikami.

Lista pytań

- 1) W swojej pracy doktorskiej Kandydatka przedstawiła kilka konkretnych metod projektowania. Które z nich zostały ostatecznie wybrane i jak metody projektowania zostały zaimplementowane w modelu? Proszę odnieść się do metody trzech równań i wyrazić swoją opinię na adekwatność zastosowania do projektowania betonu modyfikowanego nanorurkami i nanowłóknami węglowymi?
- 2) Włókna węglowe i stalowe są tańsze i zapewniają poprawę przewodności betonu. Proszę wyjaśnić swój wybór i powody, dla których Kandydatka ograniczyła swoją pracę do nanododatków CNT i CNF.
- 3) Jak Kandydatka ocenia rzeczywistą zdolność CNF i CNT do wzmacniania betonu? Jaki jest Pani zdaniem zadowalający poziom dodatku nanorurek i nanowłókien węglowych do kompozytu cementowego, który uzasadniałby ich zastosowanie?
- 4) Strona 133, Rysunek 7.5.30 przedstawia udział parametrów wejściowych w wartości wyjściowej. Proszę o wyjaśnienie zakodowanych parametrów wejściowych pokazanych na wykresach kołowych podczas prezentacji. Jaki był względny wpływ parametru wejściowego (waga) na wynik? Czy wartość ta została ustalona arbitralnie?
- 5) Skuteczność uczenia maszynowego zależy od wiarygodnych danych wejściowych. W artykułach, które brała pod uwagę Kandydatka właściwości mechaniczne: testy trzypunktowego zginania i ściskania były prowadzone na próbkach o zmiennej geometrii (strona 70). Jak Pani zdaniem, dane uzyskane na różnych rozmiarach próbek wpływają na wyniki? Jaki jest wpływ wielkości próbki na wytrzymałość betonu i w jaki sposób efekt skali mógł wpłynąć na wyniki Pani symulacji?
- 6) Czy widzi Pani możliwość uzyskania większej spójności między modelem a wynikami eksperymentalnymi? Jakie mogą być potencjalne źródła błędów generujących takie anomalie (moduł Younga betonu 200 GPa, wytrzymałość na rozciąganie 10 MPa, przy wytrzymałości na ściskanie 30 MPa)? W jaki sposób uniknąć takich rozbieżności z rzeczywistymi parametrami betonu?

Ostateczny wniosek i oświadczenie podsumowujące

Wyżej wymienione sugestie i krytyczne uwagi nie zmieniają mojej pozytywnej opinii o tej pracy. Rozprawa doktorska spełnia wszystkie wymagane kryteria tj.:

- jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego, jakim jest wykorzystanie sieci neuronowych do przewidywania właściwości mechanicznych i elektrycznych betonu z dodatkiem CNT i CNF
- wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną doktoranta w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport.
- potwierdza zdolność doktorantki do prowadzenia samodzielnych badań, potwierdzoną również licznymi publikacjami autorskimi, w których jest samodzielnym lub pierwszym Autorem.

Do najważniejszych zalet recenzowanej rozprawy Pani Kekez należą:

- znaczenie podjętego tematu, w tym wypełnienie luki badawczej w temacie badań zastosowania nanocząstek w betonie zdolnym do autodetekcji uszkodzeń,
- solidne ramy metodologiczne, w tym właściwy dobór metod badawczych i ich szczegółowy opis,
- świadomość ograniczeń badawczych wynikających z zastosowanej metody (*Założenia dotyczące symulacji numerycznych*) oraz ograniczonych informacji o eksperymentach w dostępnej literaturze (*Założenia dotyczące pracy eksperymentalnej*),

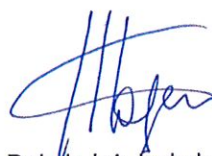
- wysoka przejrzystość pracy i uporządkowana argumentacja naukowa,
- krytyczne podejście do uzyskanych wyników symulacji,
- rzetelne opracowanie uzyskanych wyników i dokumentacja wyników (załączniki),
- umiejętność formułowania wniosków naukowych.

Podsumowując, mogę stwierdzić, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymogi Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późniejszymi zmianami). The kompleksowy program eksperymentalny prowadzony przez Kandydatkę oraz różnorodność narzędzi badawczych znacznie poszerzyły kompetencje badawcze Kandydatki, wzbogacając jej umiejętności badawcze.

Pani Sofija Kekez, autorka rozprawy pt.: „Prediction of the mechanical and electrical properties of cementitious composites using artificial neural networks”, przedłożonej na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej, wykazała się umiejętnością prowadzenia badań naukowych. Przedstawiona rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego rozwiązanego dzięki ogólnej wiedzy teoretycznej Kandydatki w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport. Biorąc powyższe pod uwagę, w pełni spełnia wymogi ustawy. Dlatego wnioskuję o dopuszczenie do obrony publicznej.

Z szacunkiem,

Miejsce: Kraków
Data: 08.09.2022



Dr hab. inż. Izabela Hager
Profesor Politechniki Krakowskiej
Katedra Inżynierii Materiałów Budowlanych
Politechnika Krakowska
Warszawska 24,
31-155 Kraków,
Polska



