

mgr inż. Alaa Al-SAEDI

Temat rozprawy doktorskiej:

*Flexible Procedure for Ready Mix Concrete Production, Delivery, and Placement in Different Environmental Conditions by Monitoring and Learning*

## STRESZCZENIE

Układanie betonu towarowego w warunkach wysokiej temperatury otoczenia stwarza znaczące wyzwania zarówno w procesie budowy, jak i jakości ostatecznego produktu. Podwyższona temperatura w betonie towarowym (RMC) może powodować problemy, takie jak pękanie termiczne i obniżenie wytrzymałości na ściskanie z powodu gradientów termicznych spowodowanych ciepłem hydratacji cementu. Skuteczne zarządzanie produkcją, transportem, układaniem i pielęgnacją RMC w zmiennych warunkach otoczenia, temperaturze mieszanki, poziomach wilgotności i czasie dostawy wymaga pełnego zrozumienia, jak te czynniki oddziałują i wpływają na właściwości betonu. Głównym celem jest osiągnięcie pożądanego poziomu jakości betonu towarowego (RMC), zwłaszcza jeśli chodzi o wytrzymałość na ściskanie betonu, aby sprostać oczekiwaniom klientów określonym przede wszystkim przez podanie klasy zamawianego betonu towarowego.

Rozprawa obejmuje kilka kluczowych aspektów, w tym budowę systemu zarządzania jakością w węźle betoniarskim (SCBP) poprzez połączenie przewodnika PMBOK z narzędziami zarządzania jakością w jednolity system. W ramach zarządzania procesami wykorzystuje się metodykę AHP (*Analytic Hierarchy Process*), która jest wdrażana za pomocą oprogramowania Expert Choice, co umożliwia elastyczną analizę kryteriów i wariantów, ułatwiając podejmowanie decyzji. W rozprawie wykorzystuje się różne narzędzia i metody, takie jak monitorowanie w czasie rzeczywistym, Six Sigma, symulację Monte Carlo oraz analizę FMEA (*Failure mode and effects analysis*). Metodę FMEA wykorzystano do oceny jakości materiałów stosowanych w produkcji betonu towarowego. Ocenie poddano właściwości wody, cementu, kruszywa drobnego i grubego. Badania miały na celu identyfikację renomowanych dostawców zdolnych do dostarczenia wysokiej jakości materiałów (surowców). Wdrożono także specjalne strategie, takie jak na przykład: stosowanie formuły z lodem w celu obniżenia temperatury mieszanki (uwzględniając zawartość wody w mieszance betonowej).

Podczas badań skoncentrowano się na poprawie właściwości mieszanki RMC poprzez monitorowanie w czasie rzeczywistym, co obejmowało kontrolowanie temperatury mieszanki betonowej, temperatury otoczenia, wilgotności względnej, prędkości wiatru i tempa parowania oraz czasów dostawy RMC, urabialności, zawartości powietrza, porowatości oraz określenie ich wpływu na wytrzymałość na ściskanie w różnych warunkach (pory roku).

Na zakończenie przeprowadzono badania w celu oceny wpływu różnych czynników przed i po wprowadzeniu usprawnień w mieszance, mając na celu osiągnięcie zerowych defektów. Wykorzystano techniki uczenia maszynowego, w szczególności sztuczne sieci neuronowe ANN (Artificial Neural Network). Sieci te pozwalają na przewidywanie wytrzymałości na ściskanie betonu towarowego (RMC) na podstawie parametrów i warunków zmierzonych w poprzednich etapach, włącznie z całkowitym czasem dostawy.

Wyniki badań wskazują na znaczącą poprawę średniej wytrzymałości na ściskanie RMC, przekraczającą 50% po wprowadzeniu opisywanych usprawnień w produkcji, transporcie i układaniu mieszanki betonowej. Jak wykazano po wdrożeniu opisywanych usprawnień możliwe jest osiągnięcie wytrzymałości na ściskanie na poziomie 53 MPa w porównaniu do poprzednio osiągniętych 25 MPa. Wynik ten uzyskano poprzez zastosowanie różnych strategii, takich jak: selekcja dostawców (co umożliwia zastosowanie surowców wysokiej jakości), usprawnienie produkcji mieszanki betonowej oraz właściwe zarządzanie procesami transportu, układania i pielęgnacji betonu towarowego (np. kontrola temperatury otoczenia, sterowanie temperaturą mieszanki betonowej).

W rozprawie wykorzystano modele sztucznych sieci neuronowych umożliwiające przewidywanie wytrzymałości na ściskanie RMC w oparciu o parametry mieszanki betonowej dotyczące węzła betoniarskiego (SCBP) i placu budowy, uwzględniające różne warunki środowiskowe w różnych porach roku. Modele te wykazują skuteczne możliwości predykcji, z wysokimi współczynnikami korelacji ( $R^2$ ) i niskim średnim błędem kwadratowym (RMSE). Z przeprowadzonych badań wynika, że wartości współczynnika korelacji  $R^2$  dla wytrzymałości na ściskanie betonu towarowego RMC wynoszą 91,9%, 99,7% i 94,3% w sezonie wiosennym, letnim i zimowym (odpowiednio) na placu budowy oraz 94,5%, 98,1% i 60,4% (odpowiednio) w wytwórni betonu towarowego (SCBP). RMSE dla wytrzymałości na ściskanie RMC jest różny i wynosi od 0,3662 do 1,534. Przedstawiony model, charakteryzujący się odpowiednią elastycznością, pozwala spełnić różne wymagania klienta.

Podsumowując, łącząc podejście numeryczne i eksperymentalne, rozprawa ta oferuje skuteczną i elastyczną procedurę doskonalenia jakości betonu towarowego w różnorodnych warunkach środowiskowych.

## SUMMARY

Placing ready-mix concrete under high ambient temperatures creates significant challenges both in the construction process and the quality of the final product. Elevated temperatures in ready-mix concrete (RMC) can cause problems such as thermal cracking and reduced compressive strength due to thermal gradients caused by the heat of hydration of the cement. Effectively managing the production, transportation, placement and curing of RMCs under varying environmental conditions, mix temperatures, humidity levels and delivery times requires a full understanding of how these factors interact and influence the properties of concrete. The main goal is to achieve the desired quality level of ready-mixed concrete (RMC), especially in terms of compressive strength of the concrete, in order to meet customer expectations determined primarily by the class of ready-mixed concrete ordered.

The dissertation covers several key aspects, including the construction of a quality management system for a concrete mixing plant (SCBP - *Stationary Concrete Batching Plant*) by combining the PMBOK guide with quality management tools into a unified system. Process management uses the AHP (Analytic Hierarchy Process) methodology, which is implemented using Expert Choice software, which enables flexible analysis of criteria and variants, facilitating decision-making. The dissertation uses various tools and methods, such as real-time monitoring, Six Sigma, Monte Carlo simulation and FMEA analysis (*Failure mode and effects analysis*). The FEMA method was used to assess the quality of materials used in the production of ready-mixed concrete. The properties of water, cement, fine and coarse aggregate were assessed. The research aimed to identify reputable suppliers capable of providing high-quality materials (raw materials). Special strategies have also been implemented, such as: using an ice formula to lower the mix temperature (taking into account the water content of the concrete mix).

This research focused on improving RMC mix properties through real-time monitoring, which included controlling concrete mix temperature, ambient temperature, relative humidity, wind speed and evaporation rates, and RMC delivery times, workability, air content, porosity and determining their effect on strength for compression in various conditions (seasons).

Finally, studies were conducted to evaluate the impact of various factors before and after making improvements to the mix, with the goal of achieving zero defects. Machine learning techniques were used, in particular artificial neural networks ANN (Artificial Neural Network). These networks allow the prediction of the compressive strength of ready-mix concrete (RMC) based on the parameters and conditions measured in the previous stages, including the total delivery time.

The test results indicate a significant improvement in the average compressive strength of the RMC, exceeding 50% after introducing the described improvements in the production, transport and placement of the concrete mix. As shown, after implementing the described improvements, it is possible to achieve a compressive strength of 53 MPa compared to the previously achieved 25 MPa. This result was achieved by using various strategies, such as: selection of suppliers (which enables the use of high-quality raw materials), improvement of the production of the concrete mix and proper management of the processes of transport, laying and care of ready-mix concrete (e.g. controlling the ambient temperature, controlling the temperature of the concrete mix).

In this dissertation artificial neural network models to predict the compressive strength of RMC based on concrete mix parameters related to the concrete mixing plant (SCBP) and the construction site, had been used taking into account different environmental conditions at different times of the year (seasons). These models demonstrate effective prediction capabilities, with high correlation coefficients ( $R^2$ ) and low root mean square error (RMSE). The conducted research shows that the values of the correlation coefficient  $R^2$  for the compressive strength of RMC ready-mix concrete are 91.9%, 99.7% and 94.3% in the spring, summer and winter seasons (respectively) at the construction site and 94.5%, 98.1% and 60.4% (respectively) in the ready-mix concrete plant (SCBP). The RMSE for the RMC compressive strength varies and ranges from 0.3662 to 1.534. The presented model, characterized by appropriate flexibility, allows it to meet various customer requirements.

In summary, by combining numerical and experimental approaches, this thesis offers an effective and flexible procedure for improving the quality of ready-mix concrete under a variety of environmental conditions.