

Spis treści

Jacek DAWIDOWICZ

Badania struktur sieci neuronowych typu MLP do oceny układu stref ciśnienia systemu dystrybucji wody
Research of structures of MLP artificial neural networks to evaluate the pressure zones of water distribution system..... 53

Jacek DAWIDOWICZ

Diagnostyka doboru średnic przewodów wodociągowych za pomocą sztucznych sieci neuronowych
typu MLP: przykład obliczeniowy
Diagnostics of diameter selection of water pipes by using MLP artificial neural networks: case of study..... 61

Joanna GWOŹDZIEJ-MAZUR, Piotr Krzysztof TUZ

Porównanie strat pozornych oraz dobór wodomierza głównego w budynkach użyteczności publicznej
Comparison of the apparent loss and selection of the main water meter in public buildings..... 69

Marta KOSIOR-KAZBERUK, Julita KRASSOWSKA

Fracture behaviour of basalt and steel fibre reinforced concrete..... 73

Dorota MAŁASZKIEWICZ

Metakaolinit jako pucolanowy dodatek do betonu - przegląd stanu wiedzy
Metakaolin as a pozzolanic addition for concrete - review..... 81

Jerzy OBOLEWICZ

Zagrożenia w inżynierii produkcji budowlanej
Threats in engineering of construction production..... 95

Abstracts Vol. 6 No. 2

Jacek DAWIDOWICZ

Research of structures of MLP artificial neural networks to evaluate the pressure zones of water distribution system

Designing of water distribution systems is inherently associated with hydraulic simulations the purpose of which is to determine the flow rate in individual system sections, selection of pipe diameters, calculation of pressure losses and of the pressure head at nodes. In the water distribution system design and hydraulic calculations one should, inter alia, check a pressure head in different parts of the system. It is also important to establish whether the system should consist of one or more pressure zones. It is connected with the appropriate location of network pumping stations and pressure reducing stations. There are many methods of calculation of water distribution systems that allow you to solve tasks for various structures of pipeline. Computer programmes based on the above methods calculate the value required variables describing the individual elements of the system, but do not have procedures for assessing their accuracy. Currently, there are no, and probably there will be no programmes which would replace a designer in the aforementioned tasks. However, nowadays one tries to develop computer programmes featuring certain degree of creativity in order to facilitate user decision making. The article describes research on the various structures of multilayer perceptrons designed to evaluate the pressure zones the water distribution system. The task of evaluation system was defined as a classification. Problems in the calculation of water distribution systems related to the amount of pressure and the division of the system into zones described using classes. A neural network based on input variables that describe the hydraulic conditions and terrain, classifies the problem occurring in a given node water distribution system. The article contains a table with tested multilayer perceptrons, learning error values, classification results and a table with sensitivity analysis network input variables. The resulting neural network should complement the basic methodology for calculating the water distribution systems with elements of evaluate the results calculations.

Jacek DAWIDOWICZ

Diagnostics of diameter selection of water pipes by using MLP artificial neural networks: case of study

Calculations of water distribution systems are the most frequently performed, because after the first calculations the correct solution, from a technical point of view, are generally not obtained. After each run the calculation takes evaluation of the results, correction of data and next calculation. Assuming that the calculation is a process to obtain the right solutions, we can talk about the process of calculation and diagnosis of the calculation. This article provides an example of calculation diagnostic method aimed at assessing the selection of diameter water pipes. The proposed method is based on the theory of diagnostic processes and neural modelling.

Joanna GWOŹDZIEJ-MAZUR, Piotr Krzysztof TUZ

Comparison of the apparent loss and selection of the main water meter in public buildings

Very import and necessary condition to select water meters in a right way is a taking into account the apparent loss of water meters. This article discusses issues related to the volume of water consumption in one of a select group of public buildings. An analysis of loss on a waterworks installation has also been presented. The obtained information allowed to determine a detailed picture of the waterworks operational situation in the studied group of objects.

Marta KOSIOR-KAZBERUK, Julita KRASSOWSKA

Fracture behaviour of basalt and steel fibre reinforced concrete

The pre-peak and post-peak softening behaviour of fine grained concrete with steel fibres and basalt fibres were investigated. The load-crack mouth opening displacement and load-deflection relationships, obtained in three-point bending test for specimens with U-notches, were used to analyze the fracture behaviour as well as to calculate the fracture energy. The strength properties of concretes tested were also compared. The modification of fracture plots, recorded under load, indicated the capability of basalt fibres to resist crack propagation. The incorporation of steel fibres caused considerable increase in fracture energy resulting in much more ductile behaviour of concrete in comparison to basalt fibre concrete. The differences in fracture behaviour of both type fibre reinforced concretes were pointed out.

Dorota MAŁASZKIEWICZ

Metakaolin as a pozzolanic addition for concrete – review

Mineral additions have become an integral part of concrete technology. They are a partial replacement of Portland cement, the manufacture of which requires high energy consumption and is environmental damaging. These may be naturally occurring materials, industrial wastes, by-products or materials requiring less energy to manufacture. The utilization of calcined clay, in the form of metakaolin, as pozzolanic addition for mortars and concretes has received considerable attention in recent years. It improves mechanical performance and exhibits considerable enhancement in durability properties. This paper presents an overview of the work carried out on the use of metakaolin as partial replacement of cement particularly useful in mortars and concretes subjected to hazardous environment. The literature demonstrates that metakaolin is an effective addition which causes improvement in the pore structure and hence the durability.

Jerzy OBOLEWICZ

Threats in engineering of construction production

The threats in work can lead to material damage, damage of body, rise of disease or death. In article chosen questions in the field of accident rate in construction. The classification of threats were defined and presented. The engineering of construction production as well as the threats which can occur here were characterised. The special attention was paid on engineering prevention in process of construction.

BADANIA STRUKTUR SIECI NEURONOWYCH TYPU MLP DO OCENY UKŁADU STREF CIŚNIENIA SYSTEMU DYSTRYBUCJI WODY

Jacek DAWIDOWICZ*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: W artykule opisano badania nad różnymi strukturami sztucznych sieci neuronowych typu perceptron wielowarstwowy MLP przeznaczonych do oceny układu systemu dystrybucji wody. Problem oceny układu systemu został potraktowany jako zadanie klasyfikacji. Zdefiniowano klasy opisujące problemy występujące w procesie obliczeń związane z wysokością ciśnienia i podziałem systemu na strefy. Sieć neuronowa na podstawie zmiennych wejściowych, opisujących warunki hydrauliczne i terenowe, dokonuje klasyfikacji wskazując występujący problem w danym węźle systemu dystrybucji wody. Zamieszczono zestawienia tabelaryczne struktur przebadanych sieci neuronowych, wartości błędu uczenia, trafność klasyfikowania oraz analizę wrażliwości zmiennych wejściowych. Uzyskana sieć neuronowa ma za zadanie uzupełnić podstawową metodykę obliczeń systemów dystrybucji wody o elementy oceny uzyskanych wyników obliczeń.

Słowa kluczowe: system dystrybucji wody, sieci neuronowe, strefy ciśnienia, klasyfikacja.

1. Wprowadzenie

Projektowanie systemu dystrybucji wody wiąże się z wykonaniem obliczeń, podczas których należy między innymi ustalić odpowiedni układ stref ciśnienia. Niekorzystne ukształtowanie terenu lub znaczna rozległość terytorialna systemu dystrybucji wody, może pociągać za sobą konieczność wydzielenia dodatkowych stref związanych z podnoszeniem lub redukcją ciśnienia.

W obliczeniach systemów dystrybucji wody od wielu lat wykorzystuje się technikę komputerową. Aktualnie stosowane programy komputerowe charakteryzują się znacznymi możliwościami w zakresie edycji danych, przeglądania wyników, jak i symulacji dynamicznych (Knapik, 2000; Rossman, 2000). Programy obliczeniowe coraz częściej korzystają z możliwości GIS (Kwietniewski, 2013; Shamshi, 2005) oraz CAD (Walski i in., 2003), lecz nie dysponują lub w bardzo ograniczonym zakresie procedurami oceny poprawności uzyskanych wyników. W związku z powyższym dąży się do stworzenia programów obliczeniowych, które będzie charakteryzować pewien stopień kreatywności. Interesującym rozwiązaniem, które można wykorzystać do tego celu są sztuczne sieci neuronowe, których funkcjonowanie oparte jest na pozyskiwaniu wiedzy z przykładów uczących opisujących rozpatrywany problem.

W niniejszej pracy opisano badania nad różnymi strukturami sztucznych sieci neuronowych typu perceptron wielowarstwowy (ang. MLP – *multilayer*

perceptron), których zadaniem będzie ocena układu systemu dystrybucji wody na podstawie uzyskanych wyników obliczeń hydraulicznych. Zamieszczono zestawienia tabelaryczne struktur przebadanych sieci neuronowych, wartości błędów uczenia, wyniki klasyfikacji oraz analizę wrażliwości zmiennych wejściowych. Uzyskana sieć neuronowa ma za zadanie uzupełnić podstawową metodykę obliczeń systemów dystrybucji wody o elementy oceny uzyskanych wyników obliczeń.

2. Problemy związane z ustaleniem właściwego układu systemu dystrybucji wody

Problem oceny układu systemu został potraktowany jako zadanie klasyfikacji. W tym celu, zdefiniowano zmienną nominalną *UKL*, w skład której wchodzi pięć klas opisujących problemy obliczeniowe wynikające z niewłaściwej wysokości ciśnienia, koniecznością wydzielenia strefy ciśnienia oraz jedną klasę związaną z poprawnym przebiegiem linii ciśnienia. Poszczególne klasy przedstawiają się następująco (Dawidowicz, 2015):

- zbyt duża wysokość ciśnienia w wybranym węźle systemu dystrybucji wody spowodowana zbyt wysokim ciśnieniem w źródle zasilania w wodę (*etykieta STW*),
- wysokość ciśnienia w wybranym węźle systemu dystrybucji wody poniżej wartości wymaganej

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: j.dawidowicz@pb.edu.pl

- spowodowana zbyt niskim ciśnieniem w źródle zasilania w wodę (etykieta *STM*),
- zaleca się korektę średnic w celu zmniejszenia strat ciśnienia na drodze pomiędzy źródłem zasilania a wybranym węzłem w systemie dystrybucji wody (etykieta *SR*),
 - zaleca się wprowadzenie pompowni sieciowej w danym węźle i wyodrębnienie za danym węzłem oddzielnej strefy ciśnienia (etykieta *PO*),
 - zaleca się wprowadzenie reduktora ciśnienia w danym węźle i wyodrębnienie za danym węzłem oddzielnej strefy ciśnienia (etykieta *RD*),
 - prawidłowy przebieg linii ciśnienia (poprawne ciśnienie) na drodze pomiędzy źródłem zasilania a wybranym węzłem w systemie dystrybucji wody (etykieta *RP*).

Zadaniem sieci neuronowej jest klasyfikacja odpowiedniej wartości zmiennej *UKL* dla poszczególnych węzłów systemu dystrybucji wody. Przynależność konkretnej klasy do węzła zależy będzie od parametrów, które opisują ukształtowanie terenu, długość przewodów od źródła do poszczególnych węzłów w systemie dystrybucji, wysokość ciśnienia zasilania oraz wysokość ciśnienia w poszczególnych węzłach, straty ciśnienia, materiał przewodów. Składowe wektora wejściowego *X* do uczenia sieci neuronowej przedstawiają się następująco (Dawidowicz, 2015):

- wysokość ciśnienia w węźle zasilającym system dystrybucji wody (*H_WZ*),
- długość najkrótszej drogi w sieci od węzła zasilającego do wybranego węzła (*L_MIN_WZ*),
- różnica rzędnych terenu pomiędzy węzłem zasilającym a wybranym węzłem systemu dystrybucji wody (*delTER_WZ*),
- maksymalna różnica rzędnych terenu występująca na najkrótszej drodze pomiędzy węzłem zasilającym a wybranym węzłem systemu (*delTER_MAX*),
- suma strat ciśnienia na najkrótszej drodze pomiędzy węzłem zasilającym a wybranym węzłem systemu (*SUM_delH_L*),
- maksymalna wysokość ciśnienia na najkrótszej drodze pomiędzy węzłem zasilającym a wybranym węzłem systemu (*MAX_H*),
- średnia ważona współczynników chropowatości bezwzględnej *k* rurociągów na trasie pomiędzy węzłem zasilającym a wybranym węzłem systemu (*SR_K*),
- wysokość ciśnienia w wybranym węźle systemu (*H_WS*),
- klasa zmiennej *UKL* (wartość wyjściowa sieci neuronowej).

Najkrótsza droga pomiędzy źródłem zasilania i kolejnymi węzłami w systemie dystrybucji wody była obliczana za pomocą algorytmu Dijkstry (Cormen i in., 2012; Dijkstra, 1959). Uzyskano zbiór 8427 przykładów uczących, reprezentujących wszystkie opisane powyżej klasy wraz z przypisaną etykietą.

3. Wprowadzenie do problematyki sztucznych sieci neuronowych

Najczęściej stosowanym rodzajem jednokierunkowej sztucznej sieci neuronowej jest perceptron wielowarstwowy MLP, który składa się z neuronów ułożonych w warstwy. Neurony połączone są pomiędzy warstwami na zasadzie „każdy z każdym”, natomiast w jednej warstwie nie występują połączenia pomiędzy neuronami. Wyróżnia się trzy podstawowe typy warstw: warstwę wejściową, warstwę ukryte oraz warstwę wyjściową. Perceptron wielowarstwowy o odpowiedniej strukturze może modelować funkcję o prawie dowolnej złożoności. W sztucznych sieciach neuronowych liczba neuronów waha się w granicach od kilkunastu do kilkuset. Sieci zawierające kilka tysięcy i więcej neuronów uważa się za duże (Krawiec i Stefanowski, 2004). Teoretycznie liczba warstw ukrytych może być dowolna, lecz na podstawie danych literaturowych, można stwierdzić, że do rozwiązywania praktycznych problemów, wystarczy jedna lub maksymalnie dwie warstwy ukryte. W przypadku sieci wielowarstwowych jednokierunkowych nie można z góry ustalić właściwej struktury sieci dla określonego zadania. Należy ją ustalić eksperymentalnie. (Hornik, 1991; Hornik i in., 1989; Masters, 1996).

Neurony w warstwach ukrytych i wyjściowej wykorzystują jedną z funkcji aktywacji typu sigmoidalnego, unipolarną (logistyczną) (1) lub bipolarną (funkcja hiperboliczna) (2) (Bishop, 1996; Hertz i in., 1995; Osowski, 2000):

$$y = \frac{1}{1 + e^{-\beta S}} \quad y \in (0...+1) \quad (1)$$

gdzie *b* jest współczynnikiem liczbowym, zwykle o wartości 1,

$$y = \tanh(\beta S) = \frac{\exp(\beta S) - \exp(-\beta S)}{\exp(\beta S) + \exp(-\beta S)} \quad y \in (-1...+1) \quad (2)$$

gdzie *b* jest współczynnikiem liczbowym, zwykle o wartości 1.

W neuronach warstwy wyjściowej w perceptronie wielowarstwowym dostosowanym do rozwiązywania problemów klasyfikacyjnych, może być stosowana funkcja aktywacji typu *Softmax* (Bridle, 1990):

$$y = \frac{e^S}{\sum_{m=1}^M e^{S_m}} \quad y \in (0...+1) \quad (3)$$

gdzie: *S* to zagregowana wartość wejściowa neuronu, a *M* liczbą neuronów warstwy wyjściowej.

Funkcja ta jest przystosowana do problemów klasyfikacyjnych, w których stosowana jest reprezentacja zmiennej wyjściowej typu „jeden-z-*N*”. Suma aktywacji poszczególnych neuronów warstwy wyjściowej z funkcją aktywacji typu *Softmax* (3) jest równa 1, stąd aktywacje neuronów są interpretowane jako prawdopodobieństwa wystąpienia danej klasy.

3.1. Uczenie sieci perceptronów wielowarstwowych

Sieci neuronowe typu perceptron wielowarstwowy uczone są z zastosowaniem strategii uczenia nadzorowanego (z nauczycielem – ang. *supervised learning*). W tym przypadku sieci neuronowej prezentowany jest zbiór przykładów uczących, składających się z par w postaci wektora danych wejściowych \mathbf{X} oraz odpowiadających mu poprawnych (znanych) odpowiedzi, w postaci wartości numerycznej lub nominalnej. Na podstawie tych danych algorytm uczący modyfikuje wartości parametrów sieci w taki sposób, aby wyniki otrzymywane z sieci były jak najbardziej zbliżone do znanych wartości wyjściowych. Znanych jest wiele metod uczenia sieci typu perceptron wielowarstwowy. Najczęściej stosowane to (Bishop, 1996; Poradnik użytkownika. STATISTICA Neural Networks PL, 2001):

- algorytm wstecznej propagacji błędów,
- algorytm szybkiej propagacji błędów,
- algorytm gradientów sprzężonych,
- algorytm Quasi-Newtona (metoda zmiennej metryki BFGS).

Wszystkie przedstawione metody uczenia sieci jednokierunkowych, związane są z redukcją wartości funkcji błędu, która w ogólnym przypadku jest nieliniową funkcją macierzy wag. Model neuronowy powinien odwzorowywać ogólną postać poszukiwanej zależności, a nie przystosowywać się wyłącznie do danych ze zbioru uczącego. Cecha ta określana jest jako zdolność do generalizacji (uogólniania) nabytej wiedzy. W celu kontroli zdolności do generalizacji sieci w trakcie jej uczenia, zbiór danych dzielony jest na trzy części (Bishop, 1996; Krawiec i Stefanowski, 2004):

- zbiór uczący – wykorzystywany do uczenia sieci,
- zbiór walidacyjny – przypadki z tego zbioru nie są wykorzystywane do modyfikacji parametrów sieci w procesie uczenia, lecz do niezależnej, przeprowadzanej równoległe z procesem uczenia oceny jakości i zdolności do generalizacji,
- zbiór testowy – nie jest w ogóle wykorzystywany w trakcie uczenia, pozwala na wykonanie końcowej oceny jakości działania sieci po zakończonym procesie uczenia.

W przypadku dużej liczby przykładów uczących wykonuje się jednokrotny podział zbioru uczącego (ang. *hold-out*) (Bishop, 1996; Weiss i Kulikowski, 1991). Podział odbywa się w sposób losowy, przyjmując najczęściej następujące proporcje podzbiorów: 1/2 przykładów – część ucząca, 1/4 przykładów – część walidacyjna, 1/4 przykładów – część testująca.

Funkcją błędu wykorzystywaną w zadaniach klasyfikacji jest funkcja oparta na pojęciu entropii wzajemnej (entropii krzyżowej – ang. *cross-entropy*). Występuje ona w dwóch wersjach, które są stosowane w zależności od rodzaju zadania klasyfikacyjnego (Bishop, 1996). W niniejszej pracy sieć neuronowa rozpoznaje większą liczbę klas niż dwie, gdzie każdej klasie odpowiada jeden neuron w warstwie wyjściowej $M > 1$ (Entropia wielokrotna – ang. *EME* - *Entropy*

Multiple Error). W tym przypadku funkcja błędu opisana jest wzorem:

$$\mathbf{E}_{\text{EME}} = - \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M d_m^{(t)} \log y_m^{(t)} \quad (4)$$

gdzie: T jest liczbą epok uczenia sieci neuronowej, M jest liczbą neuronów w warstwie wyjściowej sieci, d jest wartością zadana dla neuronu m , a y wartością wyliczoną przez sieć dla neuronu m .

Funkcja błędu (4), przy większej liczbie neuronów w warstwie wyjściowej, powinna być stosowana łącznie z funkcją aktywacji typu *Softmax* (3). Wartości funkcji błędu (4) zostały podane w tabeli 1 dla testowanych sieci neuronowych dla podzbioru uczącego, walidacyjnego i testowego.

3.2. Analiza wrażliwości sieci neuronowej na zmienne wejściowe

Badane problemy mogą być opisane dużą liczbą zmiennych wejściowych, co znacznie komplikuje dobór struktury sieci neuronowej i proces uczenia. Z tego powodu korzystnie jest dokonać wyboru najbardziej odpowiednich zmiennych. Metodą stosowaną do przypisania stopnia ważności poszczególnym składowym wektora wejściowego \mathbf{X} jest tak zwana analiza wrażliwości. Ważność każdej składowej mierzona jest jej wpływem na błąd wyjściowy. Ponieważ wraz ze zmienną rezygnuje się z pewnej ilości danych, można spodziewać się zwiększenia błędu sieci. Podstawową miarą wrażliwości sieci na określoną zmienną jest iloraz błędów:

$$ILB_i = \frac{E_i}{E} \quad (5)$$

Błąd E_i oblicza się dla wyuczonej sieci neuronowej z pominięciem zmiennej „ i ” wektora zmiennych wejściowych \mathbf{X} . Błąd E jest to błąd sieci neuronowej dla wszystkich zmiennych wykorzystywanych w procesie uczenia sieci. Im większy błąd po odrzuceniu zmiennej, w stosunku do błędu dla wszystkich zmiennych, tym bardziej wrażliwa jest sieć na brak tej zmiennej. W przypadku, gdy iloraz błędów wynosi 1 lub jest nawet mniejszy, to usunięcie zmiennej nie ma wpływu na jakość sieci a nawet ją poprawia. Duża wartość ilorazu wskazuje na bardzo ważną zmienną (Poradnik użytkownika. STATISTICA Neural Networks PL, 2001; Przewodnik problemowy. STATISTICA Neural Networks PL, 2001). W zestawieniach tabelarycznych w dalszej części pracy, używano skróconego określenia „Iloraz”.

3.3. Ocena jakości klasyfikacji sieci neuronowej

W przypadku zadania klasyfikacji wzorcowej sieć neuronowa powinna dokonać przydziału przykładów opisanych za pomocą składowych wektora wejściowego \mathbf{X} do jednej z klas, będących zadaną wartością wyjściową. Podstawą oceny klasyfikatora jest łączny błąd

klasyfikowania (ang. *overall error rate*) zdefiniowany jako (Krawiec i Stefanowski, 2004):

$$\varepsilon_{ov} = \frac{n_{bl}}{n_{cal}} \quad (6)$$

gdzie: n_{bl} to liczba błędnie sklasyfikowanych przykładów uczących, n_{cal} liczba wszystkich przykładów uczących podlegających klasyfikacji.

Inną miarą jest trafność klasyfikowania określona jako uzupełnienie do jedynki łącznego błędu klasyfikowania, czyli:

$$\eta_{ov} = 1 - \varepsilon_{ov} = 1 - \frac{n_{bl}}{n_{cal}} - \frac{n_{popr}}{n_{cal}} \quad (7)$$

gdzie: η_{ov} to miara trafności klasyfikowania, ε_{ov} jest łącznym błędem klasyfikowania, a n_{popr} liczbą poprawnie sklasyfikowanych przykładów uczących.

Trafność klasyfikowania podawana jest oddzielnie dla zbioru uczącego, walidacyjnego i testowego w tabeli 1 zawierającej zestawienie testowanych sieci neuronowych.

4. Badania struktur sieci neuronowych do oceny układu systemów dystrybucji wody

Poszukiwania struktury perceptronu wielowarstwowego do oceny układu systemów dystrybucji wody rozpoczęto od sieci z jedną warstwą ukrytą, przyjmując zmienne wejściowe, opisane w rozdziale 2. W warstwach ukrytych zastosowano neurony nieliniowe z funkcją logistyczną (1). Próby zastosowania funkcji hiperbolicznej (2) dawały wyraźnie gorsze wyniki niż w przypadku funkcji logistycznej. We wszystkich przypadkach uczenia sieci dla rozpatrywanego problemu, przyjęto funkcję błędu Entropia (wielokrotna) (ang. *EME - Entropy Multiple Error*) według wzoru (4). W warstwie wyjściowej sieci zastosowano funkcję aktywacji *Softmax* (3). Rozpatrywany problem należy do zadań klasyfikacji wieloklasowej, czyli liczba neuronów wyjściowych jest równa liczbie dostępnych rodzajów obiektów do klasyfikacji, w tym przypadku składowych nominalnej zmiennej wyjściowej *UKL*.

W pracy (Dawidowicz, 2015) zestawiono uzyskane sieci neuronowych z jedną warstwą ukrytą dla 8 zmiennych wejściowych oraz analizę wrażliwości zmiennych wejściowych dla powyższych sieci. W tabeli 1 umieszczono sieci neuronowe z dwoma warstwami ukrytymi dla 8 zmiennych wejściowych, a w tabeli 2

Tab. 1. Sieci neuronowe do oceny układów sieci wodociągowej dla: 8 zmiennych wejściowych, dwie warstwy ukryte, funkcja błędu – Entropia (Dawidowicz, 2015)

Dane podstawowe:								
Liczba wejść sieci neuronowej: 8								
Zmienne wejściowe: H_WZ, L_MIN_WZ, delTER_WZ, delTER_MAX, SUM_delH_L, MAX_H, SR_K, H_WS (wg rozdz. 2)								
Zmienna wyjściowa: UKL (wartości nominalne STW, STM, SRP, PO, RD, RP według rozdz. 2)								
Liczba warstw ukrytych: 2								
Funkcja aktywacji warstw ukrytych: 1) logistyczna 2) logistyczna według (1)								
Funkcja aktywacji warstwy wyjściowej: Softmax według (3)								
Funkcja błędu: Entropia (wielokrotna) EEME według (4)								
Próg akceptacji: 0,8								
Próg odrzucenia: 0,2 (wartości aktywacji neuronów warstwy wyjściowej sieci, decydujące o przyjęciu lub odrzuceniu danej klasy)								
Wyniki uczenia sieci neuronowych typu perceptron wielowarstwowo:								
Nr	Liczba neuronów 1 warstwy ukrytej	Liczba neuronów 2 warstwy ukrytej	EEME podzbiór uczący	EEME podzbiór walid.	EEME podzbiór testowy	η_{ov} zbiór uczący	η_{ov} zbiór walid.	η_{ov} zbiór testowy
1	17	17	0,6265376	0,6374514	0,7380886	0,7972061	0,7816146	0,795147
2	34	17	0,3849827	0,4206156	0,4677617	0,8942957	0,8992067	0,8861409
3	34	34	0,3097973	0,3166085	0,3202717	0,9075669	0,910406	0,8973402
4	51	34	0,3327805	0,3491778	0,3886699	0,9082654	0,905273	0,9038731
5	51	51	0,3297172	0,3367582	0,3925382	0,9322468	0,9318712	0,920672
6	68	51	0,3182609	0,3236673	0,3842879	0,9383003	0,9444704	0,929538
7	68	68	0,2578764	0,3460492	0,4189603	0,9422315	0,9361007	0,9351679
8	85	68	0,2084361	0,2408573	0,32982	0,947822	0,9449627	0,9384328
9	85	85	0,206454	0,3580398	0,3693809	0,9597018	0,9458955	0,9388993

Tab. 2. Analiza wrażliwości zmiennych wejściowych sieci neuronowych z tabeli 1 (Dawidowicz, 2015)

Nr sieci z tabeli 1	Podzbiór danych	Ocena wrażliwości	Zmienna wejściowa sieci neuronowej							H_WS
			H_WZ	L_MIN_WZ	deITER_WZ	deITER_MAX	SUM_deIH	SR_K	MAX_H	
1	Zbiór uczący	Ranga	5	8	6	3	4	7	1	2
		Błąd E _i	1,67057	0,8527525	0,8930887	2,924468	1,981406	0,8755403	11,13454	5,857365
		Iloraz	2,666353	1,361056	1,425435	4,667667	3,16247	1,397427	17,77154	9,348784
		Ranga	5	8	6	3	4	7	1	2
		Błąd E _i	1,752443	0,7895062	0,856982	2,427608	1,858568	0,8211061	10,05527	5,649981
		Iloraz	2,749139	1,238535	1,344388	3,808302	2,915624	1,288108	15,77417	8,86339
2	Zbiór uczący	Ranga	4	7	6	5	3	8	1	2
		Błąd E _i	1,902982	0,8932846	1,01936	1,656403	1,935815	0,7752535	3,00958	2,619363
		Iloraz	4,943032	2,320324	2,647807	4,302539	5,028318	2,013736	7,817443	6,803847
		Ranga	3	8	6	5	4	7	1	2
		Błąd E _i	1,897927	0,8404162	0,9742855	1,693128	1,822843	0,8640797	3,125694	2,638618
		Iloraz	4,51226	1,998062	2,316332	4,025356	4,33375	2,054321	7,431237	6,273229
3	Zbiór uczący	Ranga	1	5	6	8	2	7	3	4
		Błąd E _i	5,780781	1,424778	1,271995	0,6874412	5,133351	0,9821169	3,722555	3,682698
		Iloraz	18,65988	4,599065	4,105894	2,219003	16,57003	3,170192	12,0161	11,88744
		Ranga	1	5	6	8	2	7	4	3
		Błąd E _i	5,821788	1,37078	1,227779	0,6848461	4,974284	1,063972	3,667302	3,762167
		Iloraz	18,38797	4,329575	3,87791	2,163069	15,71115	3,360528	11,58308	11,88271
4	Zbiór uczący	Ranga	4	6	7	5	3	8	1	2
		Błąd E _i	2,209148	1,416047	1,117051	1,528778	2,357824	1,110902	4,562979	2,385021
		Iloraz	6,638455	4,2552	3,356721	4,593954	7,085224	3,338241	13,71168	7,166948
		Ranga	4	6	7	5	3	8	1	2
		Błąd E _i	2,083267	1,423834	1,050637	1,523978	2,290014	1,042245	4,439155	2,513612
		Iloraz	5,966206	4,077676	3,008888	4,364477	6,558305	2,984855	12,71316	7,19866
5	Zbiór uczący	Ranga	4	6	8	5	3	7	1	2
		Błąd E _i	3,045549	1,54148	1,201567	1,653337	3,091389	1,231117	4,833538	3,844136
		Iloraz	9,236852	4,675158	3,644235	5,014408	9,375878	3,733857	14,65964	11,65889

c.d. Tab. 2. Analiza wrażliwości zmiennych wejściowych sieci neuronowych z tabeli 1 (Dawidowicz, 2015)

Nr sieci z tabeli 1	Podzbiór danych	Ocena wrażliwości	Zmienna wejściowa sieci neuronowej										
			H_WZ	L_MIN_WZ	delTER_WZ	delTER_MAX	SUM_delH	SR_K	MAX_H	H_WS			
5	Ranga		3	6	8	5	4	7	1	2			
	Błąd E _i		3,247612	1,594019	1,096528	1,652435	3,028741	1,1293	4,728991	4,011015			
	Iloraz		9,643749	4,733424	3,256127	4,906888	8,993816	3,353446	14,04269	11,91067			
	Ranga		4	6	7	5	3	8	1	2			
6	Zbiór uczaący		2,496144	1,658994	1,537654	2,414425	2,983683	1,206817	5,754871	3,811287			
	Iloraz		7,843075	5,212686	4,831425	7,586307	9,374959	3,791911	18,08224	11,97555			
	Ranga		5	6	7	4	3	8	1	2			
	Błąd E _i		2,461835	1,864796	1,475944	2,50049	3,086304	1,26788	5,54553	3,984348			
7	Iloraz		7,606067	5,761457	4,560064	7,725494	9,53542	3,917233	17,13342	12,31001			
	Ranga		2	6	7	5	4	8	1	3			
	Błąd E _i		4,056954	2,333249	1,775454	2,859697	3,291664	1,266156	8,520879	3,999045			
	Iloraz		15,73217	9,047936	6,884903	11,08941	12,7645	4,909933	33,0425	15,50761			
8	Zbiór uczaący		4,01585	2,064742	1,865491	2,895263	3,451351	1,280298	8,693368	4,026927			
	Iloraz		11,60485	5,966614	5,390827	8,366622	9,973583	3,699758	25,12176	11,63686			
	Ranga		3	5	7	6	2	8	1	4			
	Błąd E _i		4,149406	2,384814	1,469811	2,169183	4,497208	1,379946	6,943906	3,103576			
9	Iloraz		19,90733	11,44147	7,051617	10,40694	21,57596	6,620475	33,31432	14,88982			
	Ranga		3	6	8	5	2	7	1	4			
	Błąd E _i		4,084835	1,970846	1,181578	2,071828	4,613884	1,417563	6,849811	3,221422			
	Iloraz		16,95956	8,182628	4,905718	8,601888	19,15608	5,885487	28,43929	13,37481			
9	Zbiór uczaący		5,423743	2,395579	1,788485	2,920268	4,301149	2,276656	9,945098	5,984969			
	Iloraz		26,27095	11,60345	8,662875	14,14489	20,83345	11,02743	48,17102	28,98936			
	Ranga		3	6	8	5	4	7	1	2			
	Błąd E _i		5,771922	2,255051	1,432819	2,850423	4,080248	2,231076	9,569499	6,158678			
9	Iloraz		16,12089	6,298325	4,001844	7,961191	11,39607	6,231362	26,72747	17,2011			

– wyniki analizy wrażliwości sieci na zmienne wejściowe. Przegląd materiału zamieszczonego w tabeli 2 wskazuje na znaczny wpływ na błąd uczenia sieci neuronowej wszystkich zmiennych wejściowych. Rezygnacja z każdej z nich, powoduje generowanie znacznie wyższej wartości błędu uczenia. W związku z powyższym postanowiono pozostawić wyjściowy zbiór zmiennych wejściowych. Wyniki dla sieci z jedną warstwą ukrytą (Dawidowicz, 2015) były znacznie gorsze niż dla sieci z dwoma warstwami ukrytymi, opisami w niniejszym artykule. W wyniku przeprowadzonej procedury uczenia sieci neuronowych, ostatecznie jako model neuronowy przeznaczony do oceny wyników obliczeń w węzłach i układu systemu dystrybucji wody, przyjęto sieć neuronową z dwoma warstwami ukrytymi, zamieszczoną w tabeli 1 w pozycji 8. Sieć powyższa uzyskała najniższą wartość błędu uczenia EEME dla podzbioru walidacyjnego oraz bardzo wysoką trafność klasyfikacji.

5. Podsumowanie i wnioski

Wzrastające wymagania w zakresie obliczeń systemów dystrybucji wody prowadzą do poszukiwania coraz nowszych metod, które pozwolą usprawnić proces obliczeniowy oraz wprowadzić elementy inteligentnego wspomaganie. W niniejszej pracy przedstawiono badania mające na celu znalezienie struktury sztucznej sieci neuronowej do oceny układu stref ciśnienia systemów dystrybucji wody.

Przeprowadzono badania struktur sieci neuronowych typu perceptron wielowarstwowy poszukując rozwiązania pozwalającego uzyskać najlepsze wyniki. Przeprowadzono analizę wrażliwości zmiennych wejściowych. Stwierdzono, że wszystkie przyjęte zmienne wejściowe mają znaczący wpływ na wynik działania sieci neuronowej. Znalezienie odpowiedniego modelu neuronowego okazało się żmudne i czasochłonne. Seria eksperymentów numerycznych pozwoliła na utworzenie zbioru sieci neuronowych o różnych strukturach, a następnie wyselekcjonowanie sieci o najlepszych parametrach realizowanych zarówno na zbiorze walidacyjnym, jak również testowym. W wynikach klasyfikacji występuje niewielka liczba przypadków niesklasyfikowanych lub sklasyfikowanych błędnie, lecz przy zastosowaniu funkcji aktywacji Softmax w warstwie wyjściowej, uzyskuje się prawdopodobieństwo poprawności uzyskanej klasyfikacji. Rozwiązanie to pozwala ocenić pewność klasyfikacji.

W wyniku przeprowadzonych eksperymentów numerycznych można stwierdzić, że sztuczne sieci neuronowe powinny znaleźć zastosowanie w obliczeniach systemu dystrybucji wody. Należy mieć na uwadze, że proponowane rozwiązanie odnosi się do systemów dystrybucji wody średniej i małej wielkości (jednostka osadnicza maks. 60 tys. mieszkańców) z jednym źródłem zasilania. Uzyskane wyniki pozwalają wnioskować, że powyższa metoda mogłaby być uzupełnieniem tradycyjnych metod obliczeniowych.

Literatura

- Bishop C. M. (1996). *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford Univ. Press.
- Bridle J.S. (1990). Probabilistic interpretation of feedforward classification network outputs, with relationships to statistical pattern recognition. W: *Neurocomputing: Algorithms, Architectures and Applications*. Fogelman-Soulie F., Hérault J. (Eds.), Springer-Verlag, 227-236.
- Cormen T. H., Leiserson C. E., Rivest R.L., Stein C. (2012). *Wprowadzenie do algorytmów*. WNT.
- Dawidowicz J. (2015). Diagnostyka procesu obliczeń systemu dystrybucji wody z zastosowaniem modelowania neuronowego. *Biblioteka Inżynierii Środowiska, Rozprawy Naukowe nr 268*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej.
- Dijkstra E. W. (1959). A note on two problems In connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, Vol. 1, 269-271.
- Hertz J., Krogh A., Palmer R.G. (1995). *Wstęp do obliczeń neuronowych*. WNT, Warszawa.
- Hornik K. (1991). Approximation capabilities of multilayer feedforward networks. *Neural Networks*, Vol. 4, 251-257.
- Hornik K., Stinchcombe M., White H. (1989). Multilayer feedforward networks are universal approximators. *Neural Networks*, Vol. 2, 359-366.
- Knapik K. (2000). Dynamiczne modele w badaniach sieci wodociągowych. *Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*, Kraków.
- Krawiec K., Stefanowski J. (2004). *Uczenie maszynowe i sieci neuronowe*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- Kwietniewski M. (2013). *GIS w wodociągach i kanalizacji*. PWN, Warszawa.
- Masters T. (1996). *Sieci neuronowe w praktyce*. Programowanie w języku C++. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Osowski S. (2000). *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Poradnik użytkownika. (2001). *STATISTICA Neural Networks PL*. StatSoft Inc.
- Przewodnik problemowy. (2001). *STATISTICA Neural Networks PL*. StatSoft Inc.
- Rossman L.A. (2000). *EPANET 2 User's manual*, EPA/600/R-00/057. *National Risk Management Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency*, Cincinnati, OH, USA.
- Shamshi U.M. (2005). *GIS applications for water, wastewater, and stormwater systems*. CRC PressINC, Taylor & Francis Group, New York.
- Walski M.T., Chase D.V., Savic D.A., Grayman W.M., Beckwith S., Koelle E. (2003). *Advanced Water Distribution Modeling And Management*. Haestad Methods Solution Center, Haestad Press.
- Weiss S.M., Kulikowski C.A. (1991). *Computer Systems That Learn: Classification and Prediction Methods from Statistics, Neural Nets, Machine Learning and Expert Systems*. Morgan Kaufmann.

RESEARCH OF STRUCTURES OF MLP ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TO EVALUATE THE PRESSURE ZONES OF WATER DISTRIBUTION SYSTEM

Abstract: Designing of water distribution systems is inherently associated with hydraulic simulations the purpose of which is to determine the flow rate in individual system sections,

selection of pipe diameters, calculation of pressure losses and of the pressure head at nodes. In the water distribution system design and hydraulic calculations one should, inter alia, check a pressure head in different parts of the system. It is also important to establish whether the system should consist of one or more pressure zones. It is connected with the appropriate location of network pumping stations and pressure reducing stations. There are many methods of calculation of water distribution systems that allow you to solve tasks for various structures of pipeline. Computer programmes based on the above methods calculate the value required variables describing the individual elements of the system, but do not have procedures for assessing their accuracy. Currently, there are no, and probably there will be no programmes which would replace a designer in the aforementioned tasks. However, nowadays one tries to develop computer programmes featuring certain degree of creativity in order to facilitate user decision making. The article describes research on the various structures of multilayer perceptrons designed to evaluate the pressure

zones the water distribution system. The task of evaluation system was defined as a classification. Problems in the calculation of water distribution systems related to the amount of pressure and the division of the system into zones described using classes. A neural network based on input variables that describe the hydraulic conditions and terrain, classifies the problem occurring in a given node water distribution system. The article contains a table with tested multilayer perceptrons, learning error values, classification results and a table with sensitivity analysis network input variables. The resulting neural network should complement the basic methodology for calculating the water distribution systems with elements of evaluate the results calculations.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach realizacji pracy statutowej S/WBiŚ/2/14.

DIAGNOSTYKA DOBORU ŚREDNIC PRZEWODÓW WODOCIĄGOWYCH ZA POMOCĄ SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH TYPU MLP: PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Jacek DAWIDOWICZ*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: Obliczenia systemów dystrybucji wody wykonywane są najczęściej wielokrotnie, gdyż po pierwszych obliczeniach z reguły nie uzyskuje się poprawnego rozwiązania z technicznego punktu widzenia. Pojawiają się różnorodne problemy, które powinny być rozpoznane i zlokalizowane. Po każdym przebiegu obliczeniowym następuje ocena wyników, korekta danych i kolejne obliczenia. Przyjmując, że obliczenia są wieloetapowym procesem mającym na celu uzyskanie właściwego rozwiązania, można mówić o procesie obliczeniowym oraz diagnostyce procesu obliczeniowego. W niniejszym artykule zamieszczono przykład obliczeniowy metody diagnostycznej, mającej na celu ocenę poprawności doboru średnic przewodów wodociągowych. Proponowana metoda opiera się na teorii diagnostyki procesów oraz modelowania neuronowego.

Słowa kluczowe: system dystrybucji wody, obliczenia hydrauliczne, dobór średnic, diagnostyka procesów, sieci neuronowe.

1. Wprowadzenie

Obliczenia hydrauliczne systemów dystrybucji wody realizowane są za pomocą specjalistycznych programów komputerowych. Obliczenia można podzielić na dynamiczne (ang. *extended period analysis*; *dynamic analysis*) (Knapik, 2000a i 2000b; Kulbik, 2004; Rossman, 2000; Siwoń, 1998; Walski i in., 2003) i statyczne, inaczej określane jako obliczenia w warunkach ustalonych (ang. *steady-state analysis*) (Biedugnis, 1998; Gupta, 2006; Orłowski, 1997). W niniejszej pracy rozważano obliczenia za pomocą modelu statycznego dla godziny maksymalnego poboru wody przez odbiorców. Przepływy dla tych warunków są podstawą do wymiarowania średnic przewodów sieci wodociągowej oraz innych elementów systemu dystrybucji wody (Knapik i Bajer, 2010; Mielcarzewicz, 2000).

Obliczenia systemów dystrybucji wody wykonywane są najczęściej wielokrotnie, gdyż po pierwszym przebiegu obliczeniowym z reguły nie uzyskuje się poprawnego rozwiązania z technicznego punktu widzenia. Pojawiają się różnorodne problemy, które powinny być rozpoznane i zlokalizowane. W związku z powyższym można przyjąć, że jest to wieloetapowy proces obliczeniowy. Przyjmując, że obliczenia są procesem mającym na celu uzyskanie właściwego rozwiązania, można mówić o diagnostyce procesu obliczeniowego. W niniejszym artykule zamieszczono przykład obliczeniowy proponowanej

metody diagnostycznej, polegającej na ocenie poprawności doboru średnic przewodów wodociągowych.

2. Model neuronowy do oceny średnic na odcinkach obliczeniowych

W niniejszej pracy wykorzystano sieć neuronową typu perceptron wielowarstwowy (ang. MLP – *multilayer perceptron*). Jednym z podstawowych zadań wykonywanych przy użyciu sztucznych sieci neuronowych jest rozpoznawanie i klasyfikacja wzorców, czyli przydzielenie obiektu na podstawie jego cech charakterystycznych do pewnej klasy. Sieci neuronowe znajdują zastosowanie szczególnie tam, gdzie nie ma prostych reguł klasyfikacji, a obiekt opisany jest wieloma zmiennymi, które decydują o przynależności do klasy (Bishop, 1996; Masters, 1996; Osowski, 2000; Tadeusiewicz, 1993). Szczegóły badań nad strukturami sieci neuronowych do klasyfikacji średnic przewodów opisano w pracy (Dawidowicz, 2015).

Zbiór zmiennych wejściowych sieci neuronowej składa się z następujących pozycji:

- L – długość odcinka obliczeniowego przewodu wodociągowego w m,
- Q_p – przepływ na początku odcinka obliczeniowego w l/s,

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: j.dawidowicz@pb.edu.pl

- Q_k – przepływ na końcu odcinka obliczeniowego w l/s, przy założeniu możliwości występowania rozbiórów odcinkowych,
 - k – współczynnik chropowatości bezwzględnej w mm.
- Zmienną wyjściową sieci jest zmienna nominalna SR opisująca średnice nominalne przewodów wodociągowych (Dawidowicz, 2015).

W neuronach warstwy wyjściowej zastosowano funkcję aktywacji typu *Softmax* (1). Jest to funkcja wykładnicza, której wartość zostaje dodatkowo znormalizowana w taki sposób, aby suma aktywacji wszystkich M neuronów warstwy wyjściowej sieci była równa 1. Oprócz tego, że sygnały z sieci są podstawą do rozpoznania odpowiedniej klasy, dodatkowo wartości wyjściowe poszczególnych neuronów mogą być interpretowane jako oszacowania prawdopodobieństw przynależności danego sygnału wyjściowego do poszczególnych klas (Bridle, 1990). Powyższą cechę funkcji *Softmax* wykorzystano w metodzie diagnostycznej doboru średnic przewodów. Funkcja *Softmax* przedstawia się następująco:

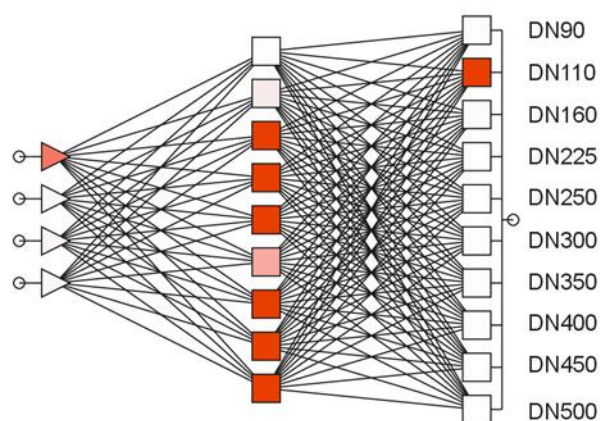
$$y = \frac{e^S}{\sum_{m=1}^M e^{S_m}} \quad y = (0 \dots + 1) \quad (1)$$

gdzie: S to zagregowana wartość wejściowa neuronu, a M jest liczbą neuronów warstwy wyjściowej.

W wyniku uczenia różnych struktur perceptronu wielowarstwowego do oceny średnic przewodów przyjęto sieć neuronową składającą się z następujących elementów (Dawidowicz, 2015):

- warstwa wejściowa z neuronami dla 4 zmiennych wejściowych,
- jedna warstwa ukryta zbudowana z 36 neuronów z logistyczną funkcją aktywacji,
- warstwa wyjściowa zbudowana z 10 neuronów z funkcją aktywacji *Softmax*, odpowiadające średnicom ze zmiennej nominalnej SR .

Schemat sieci realizującej zadanie klasyfikacji wielokryterialnej, różniące się jedynie liczbą neuronów w warstwie ukrytej pokazano na rysunku 1. Wartości aktywacji neuronów warstwy wyjściowej dla funkcji *Softmax* pokazano w tabeli 1.



Rys. 1. Schemat sieci neuronowej do klasyfikacji średnic przewodów wodociągowych (Dawidowicz, 2015)

Tab. 1. Wartości aktywacji neuronów warstwy wyjściowej dla funkcji *Softmax* (Dawidowicz, 2015)

Średnica przewodu przypisana do neuronu warstwy wyjściowej	Aktywacja neuronu warstwy wyjściowej
DN90	0,0000000000000000
DN110	0,8281449000000000
DN160	0,1718551000000000
DN225	0,0000000000000000
DN250	0,0000000000000003
DN300	0,0000000000000000
DN350	0,0000000000000000
DN400	0,0000000000000100
DN450	0,0000000000000001
DN500	0,0000000000000002
Suma aktywacji:	1,0000000000000000

3. Metoda diagnostyczna poprawności doboru średnic przewodów wodociągowych

Diagnostyka techniczna kojarzona jest przede wszystkim z uszkodzeniami urządzeń (Cholewa i Kaźmierczak, 1995). Niezwykle ważną i intensywnie rozwijającą się dziedziną jest również diagnostyka procesów. Zajmuje się ona rozpoznawaniem zmian stanu procesów, gdzie procesy rozumiane są jako ciąg celowych działań realizowanych w ustalonym czasie przez określony zbiór maszyn, urządzeń lub programów komputerowych (Kościelny, 2002a i 2002b). Każdy proces można rozumieć jako niezależny obiekt diagnozowania, który posiada wejścia oraz wyjścia, opisujące efekt jego działania. Chcąc uzyskać odpowiednią jakość przebiegu procesu, powinien on być diagnozowany, tak by w momencie zaistnienia niewłaściwych wartości parametrów procesu dokonać odpowiedniej korekty naprawczej.

W przypadku obliczeń hydraulicznych systemów dystrybucji wody, jednym z problemów diagnostycznych

jest poprawność doboru średnic przewodów wodociągowych. Proponowana metoda diagnostyki wyników obliczeń polega na porównaniu średnicy przyjętej do obliczeń (dobrej lub istniejącej na sieci) ze średnicą uzyskaną z modelu wartości wzorcowych, który został sporządzony na podstawie zbioru wyników obliczeń, w których średnice były skorygowane w procesie obliczeniowym i uznana za poprawne. Powyższe porównanie średnic można rozumieć jako ocenę odchyłań (residuów) pomiędzy wartościami wzorcowymi uzyskanymi z modelu i przyjętymi do obliczeń.

Diagnostyka procesów zajmuje się rozpoznawaniem zmian stanów procesów. W niniejszej pracy przyjęto „stan poprawny procesu” (SPP), w którym wyniki można uznać za poprawne, kończący proces obliczeniowy oraz „stan niepoprawny procesu” (SNP), wymagający dalszych korekt danych i kolejnych przebiegów obliczeniowych specjalistycznego programu komputerowego. Przyjmuje się, że końcowy stan procesu będzie poprawny SPP, jeśli wynik z testu diagnostycznego dla wszystkich przewodów wodociągowych będzie poprawny, tzn. przyjmie wartość „poprawna średnica” (PŚ). Należy jednak nadmienić, że wynik testu z założenia nie jest obligatoryjny. Ostateczna decyzja należy do osoby realizującej obliczenia.

W proponowanej metodzie diagnostycznej ocena poprawności doboru średnic przewodów odbywa się na podstawie klasyfikacji średnic ze zmiennej nominalnej SR za pomocą sieci neuronowej opisanej w rozdziale 3. Sieć neuronowa jest w tym przypadku modelem wartości wzorcowych, który został sporządzony na podstawie zbioru wyników obliczeń, w których średnice były skorygowane w procesie obliczeniowym i uznane za poprawne. Średnica nominalna DN_{SSN} uzyskana z modelu neuronowego porównywana jest ze średnicą rzeczywistą DN. Jako średnica rzeczywista DN, rozumiana jest średnica projektowana, przyjęta do obliczeń hydraulicznych lub istniejąca w funkcjonującym systemie. Porównanie średnic DN_{SSN} z modelu neuronowego oraz DN można rozumieć jako ocenę residuum w modelu diagnostycznym. Metoda diagnostyczna podaje propozycję średnicy na odcinku obliczeniowym oraz dokonuje oceny średnicy istniejącej lub przyjętej do obliczeń. W metodzie wykorzystano dwa aspekty funkcjonowania sztucznej sieci neuronowej, to znaczy wynik klasyfikacji oraz wartość aktywacji funkcji *Softmax* w warstwie wyjściowej.

Przyjęto następujące oznaczenia dla wartości aktywacji neuronów warstwy wyjściowej, stosowane w metodzie diagnostycznej:

- ADN_{ZW} – aktywacja neuronu w warstwie wyjściowej z funkcją *Softmax* o najwyższej wartości (neuron zwycięski), w sieci do klasyfikacji średnic przewodów,
- ADN_m – aktywacje neuronów warstwy wyjściowej z funkcją *Softmax*, o wartościach niższych od neuronu zwycięskiego, w sieci do klasyfikacji średnic przewodów.

W celu oceny średnicy wprowadzono trzy możliwe diagnozy:

- PŚ – poprawna średnica,
- BŚ – błędna średnica,
- NŚ – nieokreślona średnica.

Zestawienie kryteriów diagnostycznych do oceny średnic na podstawie wyników klasyfikacji za pomocą sztucznej sieci neuronowej, aktywacji neuronów warstwy wyjściowej oraz proponowanych średnic przewodów na poszczególnych odcinkach obliczeniowych zamieszczono w tabeli 2.

W przypadku, gdy średnica z modelu neuronowego DN_{SSN} jest równa średnicy rzeczywistej DN oraz aktywacja neuronu wyjściowego odpowiadającego danej średnicy ADN_{ZW} jest wyższa niż próg akceptacji (0,9), a aktywacje pozostałych neuronów ADN_m są niższe niż próg odrzucenia (0,1), średnica przewodu pozostaje bez zmian oraz uzyskuje się diagnozę opisaną jako poprawna średnica (PŚ). Jeżeli średnica z modelu neuronowego DN_{SSN} jest różna od średnicy rzeczywistej DN i aktywacje neuronów kształtują się jak wyżej, uzyskuje się błędną średnicę (BŚ) oraz propozycję przyjęcia na danym odcinku średnicy DN_{SSN} . Ponadto istnieje możliwość wystąpienia klasyfikacji, gdy aktywacje neuronów znajdują się w przedziale (0,1-0,9). W takim wypadku uzyskuje się warunkowe propozycje średnic DN, dodatkowo opisane w tabeli wyników jako nieokreślona średnica (NŚ).

W dłuższym okresie XX wieku, powszechnie były stosowane przewody wodociągowe o średnicy nominalnej DN90, stąd uwzględniono je w metodzie diagnostycznej. Obecnie, ze względu na warunki zaopatrzenia w wodę do celów przeciwpożarowych, powinno się stosować średnice nie mniejsze niż DN110. W związku z powyższym dla średnicy DN90 sporządzono odrębne kryteria diagnostyczne, uwzględniające aktualne wymagania projektowe. W przypadku, gdy na sieci wodociągowej występuje średnica DN90 i sieć neuronowa dokona klasyfikacji DN_{SSN90} oraz aktywacja neuronu zwycięskiego ADN_{ZW} odpowiadającego średnicy DN90 jest wyższa niż próg akceptacji (0,9), a aktywacje pozostałych neuronów ADN_m są niższe niż próg odrzucenia (0,1), pomimo że klasyfikacja jest poprawna diagnoza przyjmuje wartość błędna średnica (BŚ) z propozycją średnicy DN110. Podobnie jak wcześniej, gdy wartości aktywacji neuronów znajdują się w przedziale (0,1-0,9) diagnoza przyjmuje wartość nieokreślona średnica (NŚ), a system diagnostyczny proponuje średnicę DN110.

W sytuacji, gdy zostanie przyjęta do obliczeń hydraulicznych średnica DN110, a sieć neuronowa zaproponuje średnicę DN90 w obu przypadkach aktywacji neuronów metoda diagnostyczna proponuje zachowanie średnicy DN110. Informacja, że sieć neuronowa sklasyfikowała średnicę DN_{SSN90} , może być traktowana jako wskazówka do zalecenia okresowego płukania przewodu na danym odcinku ze względu na niewielkie przepływy. W zależności od wartości aktywacji, diagnoza przyjmuje wartość poprawna średnica (PŚ) lub nieokreślona średnica (NŚ).

Tab. 2. Kryteria diagnostyczne przy ocenie średnic przewodów (Dawidowicz, 2015)

Porównanie średnic dla danego odcinka	Aktywacje neuronów warstwy wyjściowej sieci neuronowej	Proponowana średnica	Diagnoza średnicy dla odcinka obliczeniowego
$DN = DN_{SSN}$	$ADN_{Zw} > 0,9$ dla pozostałych neuronów $ADN_m < 0,1$	DN	PŚ
$DN = DN_{SSN}$	$0,5 < ADN_{Zw} < 0,9$ dla pozostałych neuronów $0,1 < ADN_m < 0,5$	DN	NŚ
$DN \neq DN_{SSN}$	$ADN_{Zw} > 0,9$ dla pozostałych neuronów $ADN_m < 0,1$	DN_{SSN}	BŚ
$DN \neq DN_{SSN}$	$0,5 < ADN_{Zw} < 0,9$ dla pozostałych neuronów $0,1 < ADN_m < 0,5$	DN_{SSN}	NŚ
$DN_{90} = DN_{SSN90}$	$ADN_{Zw} > 0,9$ dla pozostałych neuronów $ADN_m < 0,1$	DN110	BŚ
$DN_{90} = DN_{SSN90}$	$0,5 < ADN_{Zw} < 0,9$ dla pozostałych neuronów $0,1 < ADN_m < 0,5$	DN110	NŚ
$DN_{110} \neq DN_{SSN90}$	$ADN_{Zw} > 0,9$ dla pozostałych neuronów $ADN_m < 0,1$	DN110	PŚ
$DN_{110} \neq DN_{SSN90}$	$0,5 < ADN_{Zw} < 0,9$ dla pozostałych neuronów $0,1 < ADN_m < 0,5$	DN110	NŚ

Tab. 3. Wariant 1 – tabela odcinków dla istniejącego systemu dystrybucji wody (Dawidowicz, 2015)

WP	WK	L	DN	DN_{SSN}	Q_{odc}	Q_p	Q_k	Δh_l	V	ADN_{Zw}	Diagnoza
-	-	m	mm	mm	l/s	l/s	l/s	m	m/s	-	
P	1	900	400	400	0,0	146,8	146,8	3,2	1,2	1,0000	PŚ
1	2	620	400	400	2,1	140,8	138,7	2,0	1,1	1,0000	PŚ
2	3	420	250	250	1,4	39,5	38,1	1,2	0,8	1,0000	PŚ
2	7	550	250	250	0,9	38,8	37,9	1,6	0,8	1,0000	PŚ
2	14	800	250	250	0,0	55,4	55,4	4,7	1,1	0,9910	PŚ
3	4	600	225	225	1,5	27,1	25,6	2,3	0,8	1,0000	PŚ
3	8	510	110	110	1,8	6,0	4,2	3,2	0,6	1,0000	PŚ
4	5	320	160	160	2,1	13,1	11,0	1,6	0,7	1,0000	PŚ
4	9	450	110	110	1,9	6,5	4,6	3,4	0,7	1,0000	PŚ
5	6	420	110	110	0,0	5,0	5,0	2,6	0,6	1,0000	PŚ
7	10	520	225	225	2,2	22,4	20,2	1,3	0,6	1,0000	PŚ
7	8	260	110	110	1,6	7,6	6,0	2,9	0,8	1,0000	PŚ
8	9	480	110	110	1,2	5,1	3,9	2,4	0,6	0,9998	PŚ
9	12	500	110	90	3,3	3,5	0,2	0,5	0,2	1,0000	PŚ
10	11	350	160	160	2,5	15,2	12,7	2,3	0,8	1,0000	PŚ
11	12	400	110	110	1,9	5,7	3,8	2,2	0,6	0,9999	PŚ
11	13	400	110	90	0,0	3,0	3,0	0,9	0,4	1,0000	PŚ
14	15	490	225	225	2,6	31,6	29,0	2,5	0,9	0,9997	PŚ
14	18	600	225	225	1,8	20,8	19,0	1,3	0,6	1,0000	PŚ
15	16	550	225	225	2,5	24,0	21,5	1,6	0,7	1,0000	PŚ
16	17	580	110	110	2,1	6,0	3,9	3,5	0,6	1,0000	PŚ
16	19	660	110	90	3,8	4,3	0,5	1,0	0,3	1,0000	PŚ
16	21	760	110	110	2,2	6,2	4,0	4,8	0,6	0,9999	PŚ
18	19	570	160	160	2,1	15,0	12,9	3,7	0,8	1,0000	PŚ
19	20	560	160	160	1,3	9,4	8,1	1,5	0,5	0,9937	PŚ
20	17	920	110	90	2,0	3,1	1,1	1,1	0,3	0,9998	PŚ

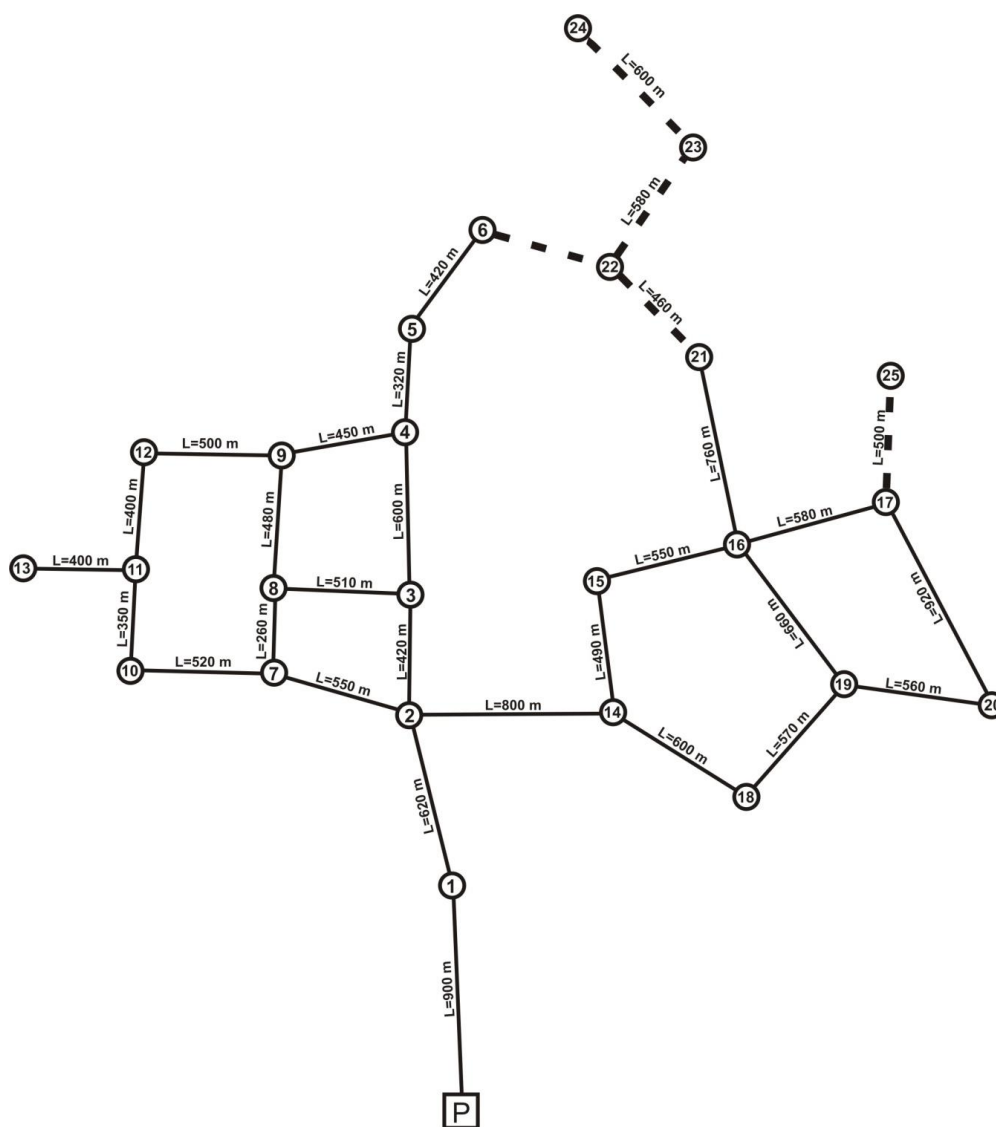
Dla wszystkich odcinków, którym metoda diagnostyczna przypisała status błędna średnica (BŚ), wymagana jest korekta średnicy. Diagnoza w postaci nieokreślona średnica (NŚ) wskazuje, że należy przeanalizować proponowane przez metodę rozwiązanie dla danego odcinka, czyli dokonać wyboru statusu diagnozy na PŚ lub BŚ. W przypadku wystąpienia odcinków ze statusem BŚ, końcowy stan procesu obliczeniowego przyjmuje wartość SNP. Należy dokonać korekty średnic i przeprowadzić obliczenia ponownie. Stan końcowy procesu przyjmuje wartość SPP w przypadku, gdy dla wszystkich odcinków zostanie uzyskany status poprawna średnica (PŚ).

Wynik diagnozy średnicy oraz wartości aktywacji neuronów zwyciężkich ADN_{ZW} warstwy wyjściowej sieci neuronowej, powinny być zamieszczane w wynikach obliczeń dla poszczególnych odcinków systemu dystrybucji wody, co pokazano na przykładzie obliczeniowym w rozdziale 4.

4. Przykład obliczeniowy korekty średnic przewodów wodociągowych

Wykonano obliczenia hydrauliczne dla przykładowej sieci wodociągowej (rys. 2) dokonując jednocześnie diagnostyki doboru średnic na poszczególnych odcinkach obliczeniowych.

Wyniki obliczeń odcinków dla wariantu pierwszego zamieszczono w tabeli 3. Większość średnic uzyskana z sieci neuronowej DN_{SSN} jest równa średnicom rzeczywistym DN przy wysokiej aktywacji neuronu warstwy wyjściowej ADN_{ZW} . Wyjątkami są odcinki 9-12, 11-13, 16-19, 17-20 na których test diagnostyczny zaleca przyjęcie średnicy DN_{90} , lecz w związku z wymaganiami przeciwpożarowymi zastosowano średnice DN_{110} . Na odcinkach powyższych występują niewielkie przepływy i niskie wartości prędkości przepływu. W związku z powyższym na tych odcinkach należy zalecić okresowe płukanie przewodu. Dla wszystkich odcinków uzyskano wysokie wartości aktywacji ADN_{ZW} oraz wynik diagnozy PŚ.



Rys. 2. Schemat przykładowego systemu dystrybucji wody (Dawidowicz, 2015)

Istniejący system dystrybucji wody ma być rozbudowany na terenach nie przewidzianych wcześniej w planach zagospodarowania przestrzennego pod zabudowę, stąd pojawia się problem przepustowości średnic istniejącego systemu. Nowe odcinki systemu pokazano na rysunku 2 linią przerywaną. W związku ze zmianą przepływów w sieci pojawia się konieczność korekty średnic przewodów na wybranych odcinkach.

Wyniki obliczeń wariantu 2 dla węzłów systemu rozbudowanego zamieszczono w tabeli 4. Na odcinkach 2-14, 4-5, 5-6, 14-15, 16-21 system diagnostyczny zaleca zmianę średnicy na większą. We wszystkich przypadkach jest to poparte wysoką wartością aktywacji neuronu danej średnicy ADN_{ZW} . Dla powyższych odcinków został przyjęty status diagnozy BŚ. Wiąże się to koniecznością korekty średnic i wykonania kolejnych obliczeń systemu dystrybucji wody. Na odcinkach 9-12, 16-19, 23-24

system diagnostyczny generuje średnicę DN90, lecz status diagnozy przyjmuje wartość PŚ, sugerując pozostawienie średnicy bez zmian. Może to sugerować konieczność wprowadzenia zalecenia okresowego płukania przewodów.

W wariancie 3 pokazano wyniki obliczeń po dokonaniu korekty średnic na wskazanych w wariancie 2 odcinkach przewodów (tab. 5). Odcinki, które wcześniej wykazywały nieprawidłowości, po korekcie średnic uznane są przez test diagnostyczny za poprawne. Pojawił się natomiast problem na odcinku 19-20, w przypadku którego po korekcie średnic przewodów, nastąpiła zmiana przepływu i sugerowana jest mniejsza średnica DN110, zamiast DN160. W tym wypadku należałoby dokonać kolejnej korekty lub pozostawić średnicę nie zmienioną z zaleceniem okresowego płukania przewodu.

Tab. 4. Wariant 2 – tabela odcinków dla rozbudowanego systemu dystrybucji wody (Dawidowicz, 2015)

WP	WK	L	DN	DN _{SNN}	q _{odc}	Q _p	Q _k	Δh _l	V	ADN _{ZW}	Diagnoza
-	-	m	mm	mm	l/s	l/s	l/s	M	m/s	-	
P	1	900	400	400	0,0	159,2	159,2	3,8	1,2	0,9401	NŚ
1	2	620	400	400	2,1	153,2	151,1	2,4	1,2	1,0000	PŚ
2	3	420	250	250	1,4	45,3	43,9	1,6	0,9	1,0000	PŚ
2	7	550	250	250	0,9	39,5	38,6	1,6	0,8	1,0000	PŚ
2	14	800	250	300	0,0	61,3	61,3	5,8	1,2	1,0000	BŚ
3	4	600	225	225	1,5	32,9	31,4	3,4	1,0	0,8099	NŚ
3	8	510	110	110	1,8	6,0	4,2	3,2	0,6	1,0000	PŚ
4	5	320	160	225	2,1	19,6	17,5	3,6	1,1	1,0000	BŚ
4	9	450	110	110	1,9	5,8	3,9	2,6	0,6	1,0000	PŚ
5	6	420	110	160	0,0	11,5	11,5	13,2	1,4	1,0000	BŚ
7	10	520	225	225	2,2	22,7	20,5	1,4	0,6	1,0000	PŚ
7	8	260	110	110	1,6	7,9	6,3	3,2	0,9	0,9996	PŚ
8	9	480	110	110	1,2	5,5	4,3	2,8	0,6	1,0000	PŚ
9	12	500	110	90	3,3	3,2	-0,1	0,3	0,2	1,0000	PŚ
10	11	350	160	160	2,5	15,5	13,0	2,4	0,8	1,0000	PŚ
11	12	400	110	110	1,9	6,0	4,1	2,5	0,6	1,0000	PŚ
11	13	400	110	90	0,0	3,0	3,0	0,9	0,4	1,0000	PŚ
14	15	490	225	250	2,6	36,0	33,4	3,2	1,0	1,0000	BŚ
14	18	600	225	225	1,8	22,3	20,5	1,5	0,6	1,0000	PŚ
15	16	550	225	225	2,5	28,4	25,9	2,2	0,8	1,0000	PŚ
16	17	580	110	110	2,1	7,6	5,5	6	0,8	0,9883	PŚ
16	19	660	110	90	3,8	3,7	-0,1	0,6	0,2	1,0000	PŚ
16	21	760	110	160	2,2	9,6	7,4	13,1	1,0	0,9964	BŚ
18	19	570	160	160	2,1	16,5	14,4	4,5	0,9	0,9656	PŚ
19	20	560	160	160	1,3	10,3	9,0	1,8	0,6	0,9999	PŚ
20	17	920	110	110	2,0	5,0	3,0	3,6	0,5	1,0000	PŚ
17	25	500	110	90	1,5	3,5	2,0	1	0,3	1,0000	PŚ
21	22	760	110	90	1,1	3,4	2,3	1,6	0,4	0,9549	PŚ
22	23	580	110	110	1,5	6,6	5,1	4,8	0,7	1,0000	PŚ
23	24	600	110	90	1,1	3,1	2,0	1	0,3	1,0000	PŚ
6	22	480	110	110	1,2	6,5	5,3	4,1	0,7	1,0000	PŚ

Tab. 5. Wariant 3 – tabela odcinków obliczeń rozbudowanego systemu po korekcie średnic przewodów (Dawidowicz, 2015)

WP	WK	L	DN	DN _{SNN}	q _{odc}	Q _p	Q _k	Δh _i	V	ADN _{ZW}	Diagnoza
-	-	m	mm	mm	l/s	l/s	l/s	m	m/s	-	
P	1	900	400	400	0,0	159,2	159,2	3,8	1,2	0,9401	PŚ
1	2	620	400	400	2,1	153,2	151,1	2,4	1,2	1,0000	PŚ
2	3	420	250	250	1,4	44,8	43,4	1,6	0,9	1,0000	PŚ
2	7	550	250	250	0,9	39,5	38,6	1,6	0,8	1,0000	PŚ
2	14	800	300	300	0,0	61,8	61,8	2,2	0,9	1,0000	PŚ
3	4	600	225	225	1,5	32,4	30,9	3,3	0,9	0,9629	PŚ
3	8	510	110	110	1,8	6,0	4,2	3,2	0,6	1,0000	PŚ
4	5	320	225	225	2,1	19,1	17,0	0,6	0,5	1,0000	PŚ
4	9	450	110	110	1,9	5,9	4,0	2,7	0,6	1,0000	PŚ
5	6	420	160	160	0,0	11,0	11,0	1,7	0,6	1,0000	PŚ
7	10	520	225	225	2,2	22,7	20,5	1,4	0,6	1,0000	PŚ
7	8	260	110	110	1,6	7,9	6,3	3,1	0,9	0,9996	PŚ
8	9	480	110	110	1,2	5,4	4,2	2,8	0,6	1,0000	PŚ
9	12	500	110	90	3,3	3,2	-0,1	0,3	0,2	1,0000	PŚ
10	11	350	160	160	2,5	15,5	13,0	2,4	0,8	1,0000	PŚ
11	12	400	110	110	1,9	6,0	4,1	2,5	0,6	1,0000	PŚ
11	13	400	110	90	0,0	3,0	3,0	0,9	0,4	1,0000	PŚ
14	15	490	250	250	2,6	38,9	36,3	1,4	0,8	1,0000	PŚ
14	18	600	225	225	1,8	19,9	18,1	1,2	0,6	1,0000	PŚ
15	16	550	225	225	2,5	31,3	28,8	2,7	0,9	0,9996	PŚ
16	17	580	160	160	2,1	10,4	8,3	1,7	0,6	0,9998	PŚ
16	19	660	110	90	3,8	3,3	-0,5	0,4	0,2	1,0000	PŚ
16	21	760	160	160	2,2	10,1	7,9	2,1	0,5	0,9995	PŚ
18	19	570	160	160	2,1	14,1	12,0	3,3	0,8	1,0000	PŚ
19	20	560	160	110	1,3	7,5	6,2	0,9	0,4	0,9772	BŚ
20	17	920	110	90	2,0	2,2	0,2	0,4	0,2	1,0000	PŚ
17	25	500	110	90	1,5	3,5	2,0	1,0	0,3	1,0000	PŚ
21	22	760	110	110	1,1	3,9	2,8	2,2	0,4	0,9798	PŚ
22	23	580	110	110	1,5	6,6	5,1	4,8	0,7	1,0000	PŚ
23	24	600	110	90	1,1	3,1	2,0	1,0	0,3	1,0000	PŚ
6	22	480	110	110	1,2	6,0	4,8	3,4	0,7	1,0000	PŚ

5. Podsumowanie i wnioski

W niniejszej pracy zamieszczono przykład obliczeniowy metody diagnostyki średnic przewodów systemu dystrybucji wody. Przyjęto, że obliczenia systemu dystrybucji wody należy rozumieć jako proces, gdyż zadanie powyższe jest realizowane poprzez wielokrotne wykonanie obliczeń ze stopniowym dochodzeniem do poprawnych rezultatów. Po każdym przebiegu obliczeniowym następuje ocena wyników, korekta danych i kolejne obliczenia. Proponowana metoda opiera się na teorii diagnostyki procesów oraz modelowania neuronowego. Opisano sieć neuronową, będącą modelem wzorcowym, do klasyfikacji średnic przewodów wodociągowych na podstawie danych z obliczeń hydraulicznych.

Uzyskane wyniki pozwalają wnioskować, że powyższa metoda mogłaby być uzupełnieniem tradycyjnych metod obliczeniowych w komputerowych systemach symulacji systemów dystrybucji wody.

Literatura

- Biedugnis S. (1998). Metody informatyczne w wodociągach i kanalizacji. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa.
- Bishop C. M. (1996). *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford Univ. Press.
- Bridle J.S. (1990). Probabilistic interpretation of feedforward classification network outputs, with relationships to statistical pattern recognition. W: *Neurocomputing: Algorithms, Architectures and Applications*. Fogelman-Soulie F., Hérault J. (Eds.), Springer-Verlag, 227-236.
- Cholewa W., Kaźmierczak J. (1995). Diagnostyka techniczna maszyn. Przetwarzanie cech sygnałów. *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice.
- Dawidowicz J. (2015). Diagnostyka procesu obliczeń systemu dystrybucji wody z zastosowaniem modelowania neuronowego. Biblioteka Inżynierii Środowiska, Rozprawy Naukowe nr 268, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej*.
- Gupta R.K. (2006). Analysis and Control of Flows in Pressurized Hydraulic Networks. PhD, *UNESCO-IHE Institute*, Delft.

- Knapik K. (2000a). Dynamiczne modele w badaniach sieci wodociągowych. *Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*, Kraków.
- Knapik K. (2000b). Dynamiczne modele sieci wodociągowej. *Czasopismo Techniczne*, nr 54-57-Ś, 23-31.
- Knapik K., Bajer J. (2010). Wodociągi. Podręcznik dla studentów wyższych szkół technicznych. *Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*, Kraków.
- Kościelny J.M. (2002a) Metodologia diagnostyki procesów. W: Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania. Monografia Komitetu Automatyki i Robotyki PAN. Red. J. Korbicz, J.M. Kościelny, Z. Kowalczyk, W. Cholewa. *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*, Warszawa, 57-110.
- Kościelny J.M. (2002b). Modele w diagnostyce procesów. W: Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania. Monografia Komitetu Automatyki i Robotyki PAN. Red. J. Korbicz, J.M. Kościelny, Z. Kowalczyk, W. Cholewa. *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*, Warszawa, 29-55.
- Kulbik M. (2004). Komputerowa symulacja i badanie terenowe miejskich systemów wodociągowych. Monografie 49, *Wydawnictwa Politechniki Gdańskiej*, Gdańsk.
- Masters T. (1996). Sieci neuronowe w praktyce. Programowanie w języku C++. *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*, Warszawa.
- Mielcarzewicz Wł. (2000). Obliczanie systemów zaopatrzenia w wodę. Wyd. II, *Arkady*, Warszawa.
- Orłowski R. (1997). Modelowanie matematyczne przepływów ustalonych w systemach wodociągowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej*, Gdańsk.
- Oowski S. (2000). Sieci neuronowe do przetwarzania informacji. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa.
- Rossman L.A. (2000). EPANET 2 User's manual, EPA/600/R-00/057. *National Risk Management Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency*, Cincinnati, OH, USA.
- Siwoń Z. (1998). Hydraulic analysis of water distribution systems. *Environment Protection Engineering*, Vol. 24, No. 3-4, 5-14.
- Tadeusiewicz R. (1993). Sieci neuronowe. *Akademicka Oficyna Wydawnicza*, Warszawa.
- Walski M.T., Chase D.V., Savic D.A., Grayman W.M., Beckwith S., Koelle E. (2003). *Advanced Water Distribution Modeling And Management*. Haestad Methods Solution Center, *Haestad Press*.

DIAGNOSTICS OF DIAMETER SELECTION OF WATER PIPES BY USING MLP ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS: CASE OF STUDY

Abstract: Calculations of water distribution systems are the most frequently performed, because after the first calculations the correct solution, from a technical point of view, are generally not obtained. After each run the calculation takes evaluation of the results, correction of data and next calculation. Assuming that the calculation is a process to obtain the right solutions, we can talk about the process of calculation and diagnosis of the calculation. This article provides an example of calculation diagnostic method aimed at assessing the selection of diameter water pipes. The proposed method is based on the theory of diagnostic processes and neural modelling.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach realizacji pracy statutowej S/WBiŚ/2/14.

PORÓWNANIE STRAT POZORNÝCH ORAZ DOBÓR WODOMIERZA GŁÓWNEGO W BUDYNKACH UŻYTECZNOŚCI PUBLICZNEJ

Joanna GWOŹDZIEJ-MAZUR^{a*}, Piotr Krzysztof TUZ^b

^a Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

^b AQUA TECH Sp. j. Białystok

Streszczenie: Warunkiem koniecznym poprzedzającym prawidłowy dobór wodomierzy jest uwzględnienie zakresu strat przepływów pozornych na wodomierzach. W artykule omówione zostały zagadnienia związane z wielkością zużycia wody w jednej z wybranych grup budynków użyteczności publicznej. Została również przedstawiona analiza strat w instalacji wodociągowej. Uzyskane informacje pozwoliły na określenie szczegółowego obrazu sytuacji w warunkach rzeczywistych eksploatacji instalacji wodociągowej w badanej grupie obiektów.

Słowa kluczowe: wodomierz, zużycie wody, straty pozorne.

1. Wprowadzenie

Analizując obowiązujące przepisy prawne oraz normatywy techniczne można stwierdzić, że brak jest informacji dotyczących progu rozruchu wodomierzy głównych (PN-92/B-01706: 1992/Az1:1999 *Instalacje wodociągowe – wymagania w projektowaniu. Zmiana Az1. 6-1:2004 Wymagania dotyczące wewnętrznych instalacji wodociągowych do przesyłu wody*; PN-EN 14154-1+A2:2011. *Wodomierze. Część 1: Wymagania ogólne*; Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 18 grudnia 2006 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla przyrządów pomiarowych, Dz. U. 2007 r., Nr 3 poz. 27; Dyrektywa MID Parlamentu Europejskiego i Rady 2004/22/WE w sprawie przyrządów pomiarowych, Dz. U. UE L 135 z 31.03.2004 r.). Stąd też, jako wartość niemetrologiczna, nie powinna być ona brana pod uwagę przy podejmowaniu decyzji o zakupie urządzenia pomiarowego. Natomiast, błędy dla charakterystycznych strumieni objętości: q_{\min} – minimalny strumień objętości, q_t – pośredni strumień objętości, q_n – nominalny strumień objętości oraz q_{\max} – maksymalny strumień objętości, są określone w PN-ISO 4064-1:1997 *Pomiar objętości wody w przewodach. Wodomierze do wody pitnej zimnej. Wymagania*.

Podczas eksploatacji instalacji wodociągowej w budynkach mamy do czynienia głównie ze stratami pozornymi, na które składa się nieautoryzowana konsumpcja. Podstawowa składowa tych strat, to ta, która powstaje w wyniku nieprawidłowego doboru urządzenia pomiarowego, jakim jest wodomierz główny (Spedura i Radecki, 2008; Tuz i Dawidowicz, 2004).

Przyczyn błędów wskazań wodomierzy należy szukać między innymi w (Tuz, 2009):

- nieprawidłowym wyznaczeniu przepływu maksymalnego na podłączeniu wodociągowym, który ma wpływ na dobór wielkości urządzenia,
- wyborze nieodpowiedniej klasy metrologicznej urządzenia,
- nieprawidłowym montażu urządzenia pomiarowego,
- zewnętrznej ingerencji w urządzenie.

W celu przeprowadzenia analizy przepływów w budynkach użyteczności publicznej, wytypowano do badań jedną grupę – hotele i hotele akademickie. Otrzymane informacje pochodzą z obiektów, zlokalizowanych na terenie Polski, w których przeprowadzono monitoring przyłącza wodociągowego w celu uzyskania odczytów zużycia wody. Wodomierze, na których prowadzono badania, sprawdzono pod względem doboru ich wielkości z uwzględnieniem zapotrzebowania przeciwpożarowego. Do analizy wytypowano ponad 50 obiektów różniących się wielkością i innymi czynnikami, na przykład standardem wyposażenia. Pomiary przepływu obejmowały okresy dwu i trzytygodniowe. Dokonywane one były w przeciągu roku przy różnym obłożeniu gośćmi hotelowymi. Do badań użyto rejestratorów cyfrowych CDL. Monitoring był wykonany dla różnej wielkości obiektów i wadze impulsowania 10 l/imp oraz 100 l/imp. W przypadku impulsu, na przykład 100 l/imp oraz wyznaczeniu maksymalnego strumienia objętości mogą wystąpić błędy zaniżające kilkakrotnie wyniki natężenia przepływu w stosunku do wyników impulsów przy stosowaniu 10 l/imp. Dla zobrazowania zużycia wody w badanych

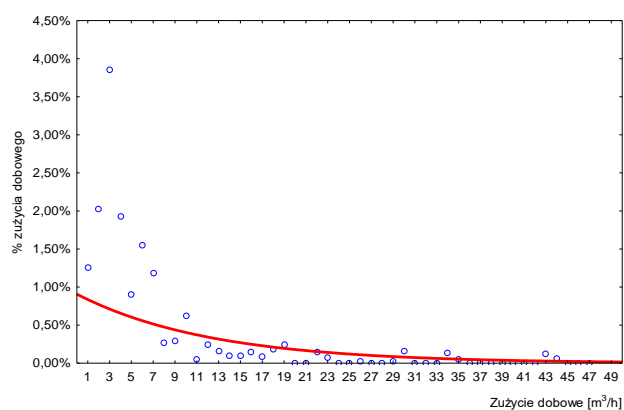
* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: j.mazur@pb.edu.pl

objektach wybrano charakterystyczne przedziały dla różnych typów i klas wodomierzy.

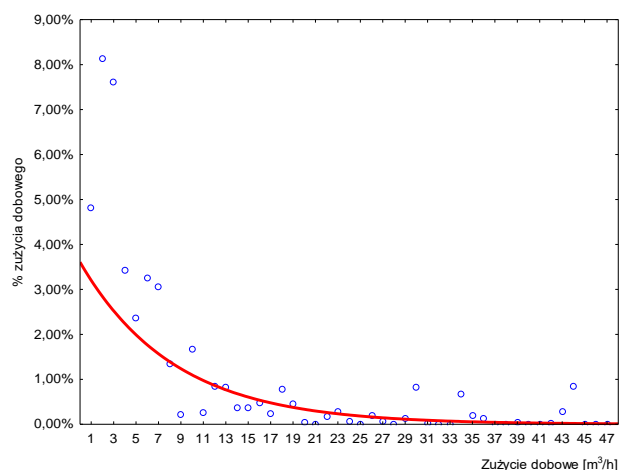
2. Struktura zużycia wody ze względu na charakterystyczne przedziały przepływu wody

Z przeprowadzonej analizy procentowego zużycia dobowego wody w badanych obiektach wynika, iż nie zawsze przepływy minimalne są rejestrowane. Na podstawie opracowanych krzywych można określić ilość procentową wody, która nie jest rejestrowana przez wodomierz o danej klasie metrologicznej i przepływie minimalnym (strata pozorną wody).

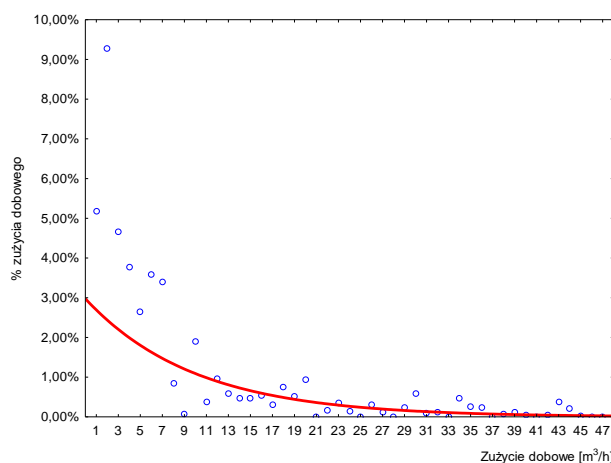
Krzywe procentowego zużycia dobowego wody w wybranych przedziałach przepływu przedstawiają rysunki 1-4.



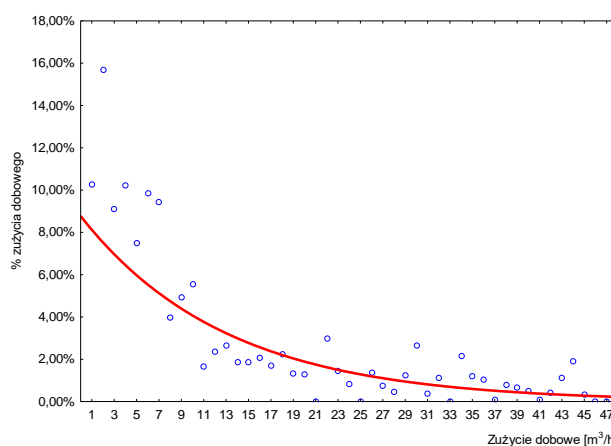
Rys. 1. Krzywa procentowego zużycia dobowego wody w obiektach hotelowych z przedziału 0-0,025



Rys. 2. Krzywa procentowego zużycia dobowego wody w obiektach hotelowych z przedziału 0,025-0,05



Rys. 3. Krzywa procentowego zużycia dobowego wody w obiektach hotelowych z przedziału 0,05-0,07



Rys. 4. Krzywa procentowego zużycia dobowego wody w obiektach hotelowych z przedziału 0,07-0,12

Zaprezentowane wykresy mogą być bardzo pomocne do kreślenia strat pozornych w obiektach hotelowych.

Na podstawie dokonanej analizy zużycia dobowego wody w badanych obiektach wyznaczono również wielkość strat pozornych w zależności od minimalnego strumienia objętości. Należy przypomnieć, że na straty pozorne składa się nieautoryzowana konsumpcja, na przykład: kradzieże oraz straty powstające w wyniku błędnych pomiarów i odczytów wodomierzy (Tuz, 2009). W związku z tym, rzeczywisty rozkład strat pozornych, w stosunku do zużycia dobowego, może być podstawą do ich uwzględnienia przy doborze wielkości oraz klasy wodomierza.

Zgodnie z regulacjami prawnymi (Dyrektywa MID, 2004) należy wyznaczyć wartość R odpowiadającą różnym klasom metrologicznym wodomierzy (klasa A, B, C i D – w hotelach spotkano się głównie z wodomierzami klasy B i C), przy czym:

$$Q_3 = \frac{Q_4}{1,25} \quad (1)$$

natomiast:

$$R = \frac{1}{\frac{Q_{\min}}{2 \cdot Q_n}} = 1,6 \cdot \frac{Q_{\min}}{Q_n} \quad (2)$$

gdzie: R jest stosunkiem Q_3/Q_1 i oznacza klasę dokładności wodomierza, Q_3 jest największym strumieniem objętości wody, przy którym wodomierz działa prawidłowo w warunkach znamionowych użytkowania w m^3/h , Q_4 jest największym strumieniem objętości wody, przy którym wodomierz może działać w sposób prawidłowy w krótkim okresie, bez uszkodzenia w m^3/h , Q_n jest strumieniem objętości równym połowie maksymalnego strumienia objętości, przy którym wodomierz może pracować przy przepływie ciągłym lub przerywanym i jego wskazania mieszczą się w granicach błędów granicznych dopuszczalnych w m^3/h , Q_{\min} jest strumieniem objętości, powyżej którego wskazania wodomierza nie powinny przekraczać błędów granicznych dopuszczalnych w m^3/h .

W związku z tym, wyznaczenie – dobranie odpowiedniej klasy metrologicznej wodomierzy danej wielkości, związane jest z wielkością strumienia Q_1 , który wyznacza granice pomiędzy zakresami pomiarowymi charakteryzującymi się różnymi wielkościami błędu granicznego – dopuszczalnego. Stąd też, po określeniu wielkości wodomierza należy określić klasę metrologiczną ($R = Q_3/Q_1$) lub minimalny strumień objętości, jakim charakteryzuje się wodomierz. Te dwa elementy razem (z założenia przynajmniej w początkowym okresie pomiaru), mają spowodować zminimalizowanie strat pozornych poniżej 1%. Dla zobrazowania znaczenia wielkości wodomierza oraz jego klasy z uwzględnieniem strat pozornych, zaprezentowano 3 przykłady.

Przykład 1

Jeśli średnie dobowe zużycie wody kształtuje się na poziomie $10 m^3$, co jest charakterystyczne dla niewielkich obiektów hotelowych, (według normy PN-ISO 4064-1:1997 – wodomierz DN 40) to ilość wody niezmierzonej na tym podłączeniu dla $q_{\min} = 200 l/h$ wynosiłaby, około 9% (według danych pomiarowych,

odczytów z wykresów), ale dla poprawnie dobranego wodomierza klasy C ($R > 160$), strata pozorna wynosiłaby poniżej 1% (Dz. U. z 2007 r., Nr 3 poz. 27).

Przykład 2:

Jeśli średnie dobowe zużycie wody kształtuje się na poziomie $25 m^3$, co jest charakterystyczne dla średniej wielkości obiektów hotelowych, (według normy PN-ISO 4064-1:1997 – wodomierz DN 80), to ilość wody niezmierzonej na tym podłączeniu wynosiłaby około 20% (według danych pomiarowych, odczytach z wykresów), ale dla poprawnie dobranego wodomierza klasy C ($R > 160$), strata pozorna wynosiłaby poniżej 4% (Dz. U. z 2007 r., Nr 3 poz. 27).

Przykład 3:

Jeśli średnie dobowe zużycie wody kształtuje się na poziomie $45 m^3$ (według normy PN-ISO 4064-1:1997 – wodomierz DN 100) to ilość wody niezmierzonej na tym podłączeniu dla $q_{\min} = 1800 l/h$ wynosiłoby, około 7,5% (według danych pomiarowych), ale dla poprawnie dobranego wodomierza klasy C ($R > 160$), strata pozorna wynosiłaby poniżej 4,5% (Dz. U. z 2007 r., Nr 3 poz. 27).

Biorąc pod uwagę aspekt finansowy, to pomimo doboru droższego, to oszczędności powstałe wskutek określenia ilości (m^3) dla przepływów minimalnych mogą znacznie przewyższać różnice wynikające pomiędzy ceną wodomierza klasy B i C. Zakładając, że wodomierz będzie poprawnie wskazywał ilość wody wodociągowej w całym okresie dopuszczalnym do pracy (5 lat), to oszczędności powstałe wskutek domierzenia objętości wody wodociągowej (minimalnych przepływów) mogą osiągnąć znaczną wartość (Dz. U. z 2007 r., Nr 3 poz. 27).

Porównanie wielkości oraz klasy wodomierzy, przy uwzględnieniu przepływów charakterystycznych wyznaczonych na podstawie danych rzeczywistych, jak również straty pozorne wyznaczone na podstawie badań przedstawia tabela 1.

Analizując wyniki zamieszczone w tabeli 1 można stwierdzić, iż wartość straty pozornej odczytana z wykresów w niektórych przypadkach, nie mieści się w granicach dopuszczalnych. Oznacza to, że objętość wody niezmierzonej w skali roku może osiągnąć znaczącą wartość.

Tab. 1. Dobór wodomierzy głównych oraz porównanie strat pozornych na podstawie danych rzeczywistych przepływów charakterystycznych dla budynków hotelowych

Zużycie [m^3/h]	odczytane z wykresu			Klasa B			Klasa C			
	$Q_{\min 100}$ [l/h]	$Q_{\max 100}$ [m^3/h]	Wodomierz	Q_{\min} [l/h]	Q_{\max} [m^3/h]	Strata pozorna [%]	Wodomierz	Q_{\min} [l/h]	Q_{\max} [m^3/h]	Strata pozorna [%]
10	63,5	2,47	DN40	200	55	14,6	DN40	90	45	6,5
20	110	3,72	DN40	200	55	7,85	DN40	90	45	3
30	155	4,96	DN50	200	60	6,1	DN40	90	45	1,3
40	201	6,12	DN50	200	60	2,4	DN50	80	50	0,7
50	247	7,44	DN65	240	70	5,1	DN65	120	55	0,5

3. Podsumowanie

Podsumowując można stwierdzić, iż przy doborze wielkości i klasy wodomierza należy brać pod uwagę straty pozorne. Może się wówczas okazać, iż czasami należy rozważyć zainstalowanie wodomierza o wyższej klasie, droższego w momencie zakupu, lecz o mniejszych wskazaniach strat pozornych.

Literatura

- Dyrektywa MID Parlamentu Europejskiego i Rady 2004/22/WE w sprawie przyrządów pomiarowych. *Dz. U. UE L 135 z 31.03.2004 r.*, 0001-0080.
- Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 18 grudnia 2006 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla przyrządów pomiarowych. *Dz. U. z 2007 r., Nr 3 poz. 27.*
- Spedura S, Radecki R. (2008). Dwa standardy określania rzeczywistych strat wody w sieciach wodociągowych. *Biuletyn Informacyjny Izby Gospodarczej „Wodociągi Polskie”*, Bydgoszcz, Nr 1/25, 31-35.

- Tuz P. (2009). Dobór i eksploatacja wodomierzy. Wybór typu licznika (cz.1). *Rynek Instalacyjny*, Nr 9, 54-59.
- Tuz P., Dawidowicz J. (2004). Problemy ustalania przepływu obliczeniowego do doboru wodomierzy. W: Materiały I Konferencji „Instalacje wodociągowe i kanalizacyjne – projektowanie, wykonawstwo, eksploatacja”. *Wyd. Seidel-Przywecki*, Warszawa, 59-69.

COMPARISON OF THE APPARENT LOSS AND SELECTION OF THE MAIN WATER METER IN PUBLIC BUILDINGS

Abstract: Very important and necessary condition to select water meters in a right way is a taking into account the apparent loss of water meters. This article discusses issues related to the volume of water consumption in one of a select group of public buildings. An analysis of loss on a waterworks installation has also been presented. The obtained information allowed to determine a detailed picture of the waterworks operational situation in the studied group of objects.

FRACTURE BEHAVIOUR OF BASALT AND STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE

Marta KOSIOR-KAZBERUK*, Julita KRASSOWSKA

Faculty of Civil and Environmental Engineering, Białystok University of Technology, Wiejska 45E, 15-351 Białystok, Poland

Abstract: The pre-peak and post-peak softening behaviour of fine grained concrete with steel fibres and basalt fibres were investigated. The load-crack mouth opening displacement and load-deflection relationships, obtained in three-point bending test for specimens with U-notches, were used to analyze the fracture behaviour as well as to calculate the fracture energy. The strength properties of concretes tested were also compared. The modification of fracture plots, recorded under load, indicated the capability of basalt fibres to resist crack propagation. The incorporation of steel fibres caused considerable increase in fracture energy resulting in much more ductile behaviour of concrete in comparison to basalt fibre concrete. The differences in fracture behaviour of both type fibre reinforced concretes were pointed out.

Key words: concrete, basalt fibre, steel fibre, pre-peak and post-peak behaviour, fracture energy, residual flexural strength.

1. Introduction

Fibre reinforced concrete has gained increasing significance over the past years, both in research and more recently in the construction industry. Especially the precast concrete industry makes use of the special characteristics of mainly fibre reinforced concrete to reduce the weight of concrete structures producing slender and light prefabricated concrete elements (Yoo et al., 2013). Besides the non-structural elements, fibre reinforcement is particularly appealing for large structural elements. Here, steel fibres may be successfully adopted in substitution, at least partially, of the conventional reinforcement (bars or welded mesh) to reduce labour costs (Sorelli et al., 2006). Also the reduction and elimination of shear reinforcement by adding steel fibres is a common approach (Garas et al., 2012). In the recent years, important efforts have been devoted to develop new types of non-metallic fibres (Kalpokaitė Dičkuvienė et al., 2013; Sim et al., 2005; Zhang et al. 2013).

However, the full potential of fibre reinforced concrete is still not fully exploited in practice. This is mainly due to a lack of specific rules for fibre reinforced concrete in building codes. The existing rules for conventional concrete can hardly be adopted for fibre reinforced concrete that is markedly non linear since fibres start working after cracking of the concrete matrix. While conventional reinforced concrete keeps a reasonable linear behaviour until the bar yield, fibre reinforced concrete has a noticeable non linear response and, depending on the fibre content and type, fibre reinforced concrete

has a quite complicated post-cracking softening behaviour (Buratti et al., 2011; Soutsos et al., 2012). Thereby fibres ensures a significant improvement of the post-cracking behaviour and provide a high degree of ductility within the brittle cement matrix and considerable increase in the fracture energy. The latter defines the work capacity up to the total failure of the material that is frequently considered to estimate the resistance of concrete to tensile stress. Fracture energy has been implemented in the mathematical models of various finite-element-programmes for non-linear modelling. Nevertheless, specific data concerning this material parameters that would provide advancement of the material models used and subsequently the calculated structural behaviour is hardly available (Voit and Kirnbauer, 2014).

The modelling of the behaviour, damage and fracture processes of concrete is extensively discussed in the literature (Karihaloo, 2003; Kosior-Kazberuk, 2013; Shah et al., 1995). The fracture mechanics, as one of the most significant field of science, is widely used to analyze the material behaviour in structure. (Bažant, 2002). The fracture mechanics parameters are used in different applications to formulate the classic criteria of failure as well as in advanced computational methods to analyze the structures made of concrete and other brittle materials.

The main purpose of the fibres is to provide a control of cracking and to increase the fracture toughness of the brittle matrix through bridging action during both micro and macrocracking of the matrix. Debonding, sliding and pulling-out of the fibres are the local mechanisms that control the bridging action (Kazemi

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: m.kosior@pb.edu.pl

et al., 2007; Shah et al., 1995). The resultant composite concrete can have considerable ductility, often termed “toughness”. The ductility characteristic is dependent on fibre type, dosage, tensile strength and anchorage mechanism.

The wire steel fibres are the most common type used in non-structural and structural applications. As generally known, steel fibres continue to carry stresses after matrix failure. The additions of the most types of steel fibres do not change considerably the compressive strength and the modulus of elasticity of concrete but has noteworthy influence on the flexural strength and residual tensile strength. Thus, the analysis of post-peak responses of steel fibre reinforced concrete is crucial. The detailed information about physical and mechanical properties of steel fibre reinforced concrete can be found for example in (Bordelon, 2007; Michels et al., 2013; Sorelli et al., 2006). The most of current experiments relate to concrete reinforced by steel fibres and very few present the research on composites with other kinds of fibres i.e. basalt fibres, which can offer the series of advantages.

Usually, the steel fibres are stiff and, in order to gain pull-out resistance, they have enlarged, flattened or hooked end, roughened surface texture or wavy profiles. They vary in length up to about 60 mm, with aspect ratios (ratio of length to nominal diameter) from 20 to 100.

In contrast, the basalt fibres are much more slender and soft in comparison to steel fibres. The typical length range is from 12 to 54 mm and the diameter range is from 9 to 20 mm. Basalt fibres are obtained from basalt rocks through melting and drawing process. Therefore, the fibre has inherited the basalt ore structure and performance characteristics, such as outstanding thermal stability, anti-corrosive performance, ideal heat insulation, sound absorption, and low moisture absorption. In addition, this fibre exhibits high strength and high module performance. It is known that the basalt fibres have better tensile strength than the E-glass fibers, greater failure strain than the carbon fibers as well as good resistance to chemical attack, impact load and fire (Sim et al., 2005; Di Lodovico et al., 2010). However, previous studies on the use of basalt fibres in concrete are limited. Sim et al. (2005) investigated the properties of concrete containing continuous basalt fibre. The results show improvement in the thermal and mechanical properties of concrete. Limited research has studied the effect of short basalt fibre on the mechanical properties of geopolymeric concrete (Dias and Thaumaturgo, 2005; Li and Xu, 2009) and mechanical and thermal features (Borhan, 2012). Kabay (2014) reported that the addition of short basalt fibers resulted in decrease in compressive strength and at the same time the enhancement of fracture energy and reduction of abrasive wear of concrete. Therefore further experimental studies should be conducted on the use of basalt fibre in cement based composites to characterize its effects on physical and mechanical properties of composites.

Model Code 2010 (2012), RILEM TC 162 (2002, 2003) and ACI 544 (1998) provide guidelines to designers

of concrete structures. However, on a practical level, current design codes for structures do not usually cover fibre reinforced materials and designers hardly accept the volunteering guidelines or research results available in scientific papers. For this reason, further research on concretes with various types of fibre is still needed to confirm their advantages, particularly the flexural toughness and fracture energy which are used for design purposes.

The aim of the research work was the investigation of the fracture behaviour of fine grained concrete with basalt fibres and steel fibres. The fibres of the same length ($l = 50$ mm) but different shape and properties were chosen for tests. The characteristics of concretes with fibres were determined in three-point-bending test on notched beam specimens.

2. Experimental program

2.1. Materials and specimens preparation

The tests were performed on fine grained cement concrete. The cement (CEM I 42,5 R) content was constant – 320 kg/m³ and the water to cement ratio of 0,50 were kept constant in all mixes. The river sand, fraction 0-2 mm and the natural aggregate with maximum diameter of 4 mm were used. The maximum size of aggregate was limited to reduce its influence on fracture properties and to provide the homogenous fibres distribution in concrete. The minimum size of specimen exceeded the maximum size of aggregate more than tenfold.

The polycarboxylate polymer based superplasticizer was used to minimize fiber clumping and enhance fiber dispersion in concrete mix. The superplasticizer was applied in the amount of 0,6% of cement mass. Table 1 gives the mix proportions for reference concrete.

Tab. 1. Mix proportions of the reference concrete.

Component	Dosage (kg/m ³)
Cement CEM I 42,5 R	320
Aggregate 0-2 mm	1326
Aggregate 2-4 mm	624
Water	160
Superplasticizer	1.92

The fibres were added into concrete as a replacement of an adequate portion of aggregate by volume. Two fibre types were used to study the concrete strength properties and post-crack behaviour: the hooked end, circular cross-section steel fibres and chopped basalt fibres. The geometry and parameters of both types of fibres are presented in Table 2. Three different volume fractions of steel fibres were applied to cover the majority of practically used fraction range: 0.5%, 1.0% and 1.5%, which was the dosage of 40, 80 and 120 kg/m³, respectively. The basalt fibres were added at three

contents of 1.0, 2.5 and 5.0 kg/m³, which gave volume fractions 0.038%, 0.095% and 0.19%, respectively. The content of basalt fibres suggested by manufacturer is 2.0 kg/m³.

Tab. 2. Properties of fibres used.

Property	Steel fibres	Basalt fibres
Fibre shape	hooked end	straight
Length (mm)	50	50
Diameter (mm)	1.0	0.02
Tensile strength (MPa)	900	1680
Elastic modulus (GPa)	200	89
Density (kg/m ³)	7850	2660

The dry aggregate was mixed with fibres followed by cement. The materials were dry mixed for 2 min before adding the water with superplasticizer. Mixing continued for a further 4 min. The time of mixing was considered sufficient for the proper dispersion of fibres in the mix without causing a "balling" effect.

The notched beams of size 100×100×400 mm were used for three-point bending test. The initial saw-cut notch with a depth equal to 30 mm and width of 3 mm was located in the mid-span place. The geometry of specimen and the way of load were presented in Fig. 1. The elongated U-notches ($a_0 / d = 0.30$) were sawn under wet conditions one day before the test. Each series was composed of 4 replicates.

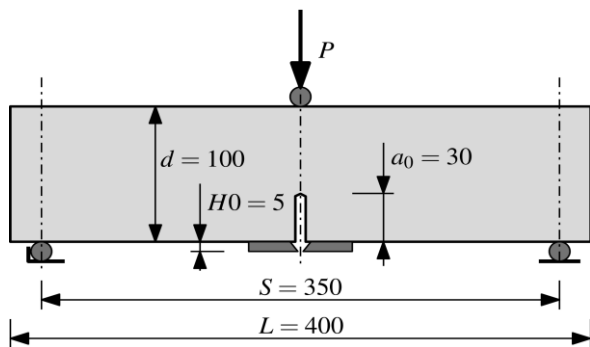


Fig. 1. Fracture testing configuration and geometry of specimen with elongated U-notch.

Moreover, for each fibre dosage three beams (100×100×400 mm) for flexural strength were also cast and four cubes (100×100×100 mm) for the compressive strength were cut from beam specimens.

The specimens were vibrated in moulds and then stored under polyethylene cover for one day. After demoulding all specimens were cured in water at the temperature of 20±2°C till they were tested.

2.2. Test procedures

A three-point bending method was used to determine the fracture performance of concretes with fibres and control

concrete without reinforcement in accordance with the recommendation of RILEM Fracture Mechanics Committee (TC50-FMC, 1985) and EN 14651 (2005).

The universal testing machine (MTS 322) with closed-loop servo control was used to achieve a stable failure of specimens. The crack mouth opening displacement (CMOD) measured at the center of the notch was a feedback signal. The clip gauge was used to measure the CMOD values. The load-deflection ($P-\delta$) curves and load – crack mouth opening displacement (P -CMOD) were determined for fracture behaviour analysis. At the same time the complete load-time cure was recorded to check the test stability. Fig. 2 shows the universal testing machine with beam specimen and clip gauge.

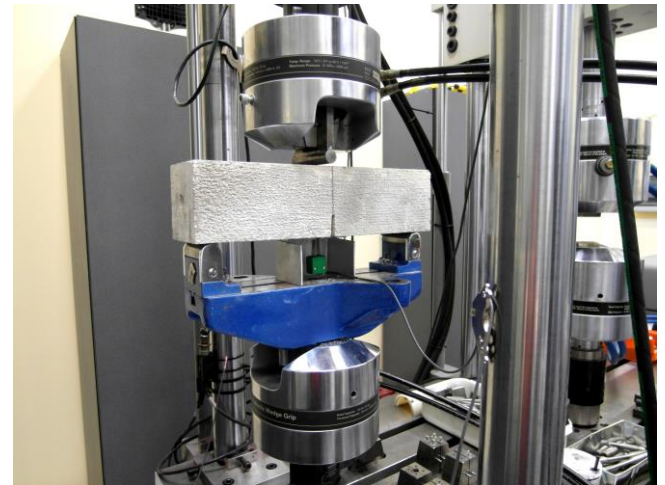


Fig. 2. Notched beam specimen during testing.

The fracture energy (G_F) is defined as the area under the load-deflection curve per unit fractured surface area and since no energy dissipation is assumed to take place at the crack tip, this area can be associated with the fracture energy:

$$G_F = \frac{\int_0^{\delta_{\max}} P(\delta) d\delta + mg\delta_{\max}}{(d - a_0)b} \quad (1)$$

where: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, d – beam depth, b – beam width, a_0 – notch depth and d_{\max} – maximum deflection. In connection with the test, the weight of the beam m was determined and included into calculation of G_F .

The secant elastic modulus were calculated from load-displacement relationship. The flexural strength was defined by the load capacity at the first crack in three-point bending test. Compressive strength of concrete was determined according to EN 12390-3 (2011).

3. Analysis of test results

3.1. Fracture behaviour of basalt fibre reinforced concrete

The fracture behaviour was analysed on the basis of P -CMOD curves and $P-\delta$ curves obtained for concrete specimens. The characteristic load P plotted versus

CMOD and P versus the deflection in the mid-span δ measured for concretes with basalt fibres were presented in Figs. 3 and 4, respectively.

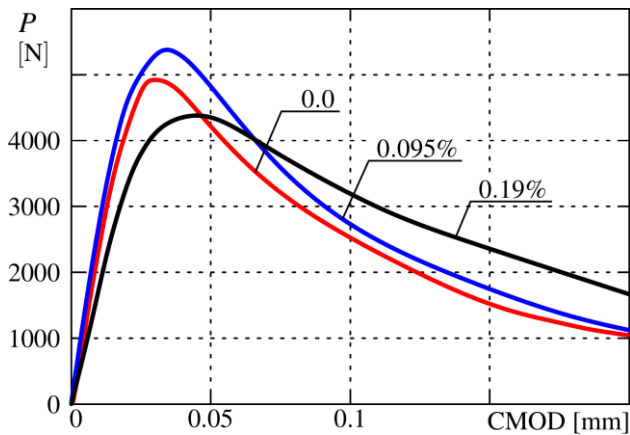


Fig. 3. Load P versus CMOD curves for concretes with various volume fractions of basalt fibres.

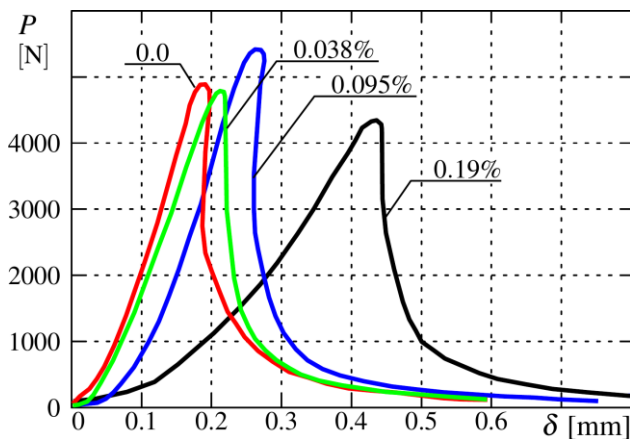


Fig. 4. Load P versus deflection δ diagrams of concretes with various volume fractions of basalt fibres.

The analysis of P -CMOD plots for concretes with basalt fibres makes it possible to investigate the changes in concrete properties related to the loss of brittle material character. From the P -CMOD diagram, one can see that the initial parts of the curve for all concretes considered are almost linear and the strain of the notch tip under tension increases slightly with the increasing load. After the linear segment of P -CMOD curve, deviation from linear response is observed and the load reaches the maximum value, which indicates the onset of crack initiation at the tip of the notch. The increase in basalt fibre content cause the increase in the length of segment until reaching the peak. The crack mouth opening displacement, recorded for maximum load for individual specimens, increased when the content of fibre increased. Generally, the $CMOD_{max}$ values for fibre reinforced concrete were greater than recorded for control concrete specimens. However, the influence of basalt fibre content on the maximum load is not clear. The addition of fibre up to 0.095% (2.5 kg/m^3) caused the increase in P_{max} , but further increase in fibre content up to 0.19% (5.0 kg/m^3) caused the decrease in maximum load value.

The post-critical part of P -CMOD curve was also influenced by content of fibres in concrete. For reference concrete the clear force drop and the strain softening behaviour were observed. For concretes with basalt fibres, the general tendency was similar, but the fibres allow transferring higher stress at large crack openings. The load decreased much slower for specimens of fibre concrete.

As can be seen from Fig. 4, there is an increasing tendency in the deflection δ_{max} in span center, recorded for P_{max} , with the increase in fibre content.

As can be found in Fig. 4, the incorporation of the basalt fibre does influence not only the post-peak behavior of concrete beam but also the pre-peak part of load-deflection curve. The comparison of ascending and descending part of load- δ diagrams for concretes with different basalt fibre dosage indicated the significant fibre influence on ascending part connected with microcrack formation and localization. To give an idea about the relative and absolute proportion of the fracture energy, Table 3 illustrates the portion of energy until crack propagation (up to achieve the breaking load P_{max} and δ_{max}) related to the total measured energy G_F . The energy demand necessary for crack initiation increased gradually with the increase in fibre volume fraction. It may be concluded that both elastic and plastic portions of energy increased. The detailed analysis of basalt fibre influence on ascending and descending part of load-deflection diagram and on variations of fracture energy was presented by Kosior-Kazberuk and Krassowska (2015).

Tab. 3 Total fracture energy G_F and portion of energy until crack propagation $G_F(\delta_{max})$ determined for specimens with basalt fibres.

Basalt fibre content (% vol.)	G_F (Nm/m ²)	$G_F(\delta_{max})$ (Nm/m ²)	$G_F(\delta_{max})$ (%)
0	98	40	41
0.038	116	49	42
0.095	133	73	55
0.190	171	99	58

The basalt fibres help to limit the generation of cracks. When the stress is transferred to the basalt fibre from cement matrix, the fibre can restrict the crack from developing. The crack continues to develop only by bypassing the fibre or pulling very thin fibre to be broken, during the course of which, an additional amount of energy is consumed. The larger fibre dosage causes the stronger restriction of fibre, and as the result the increase in fracture energy.

3.2. Fracture behaviour of steel fibre reinforced concrete

The characteristic load P plotted versus CMOD and P versus the displacement in the mid-span d measured for concretes with steel fibres were presented in Figs. 5 and 6, respectively.

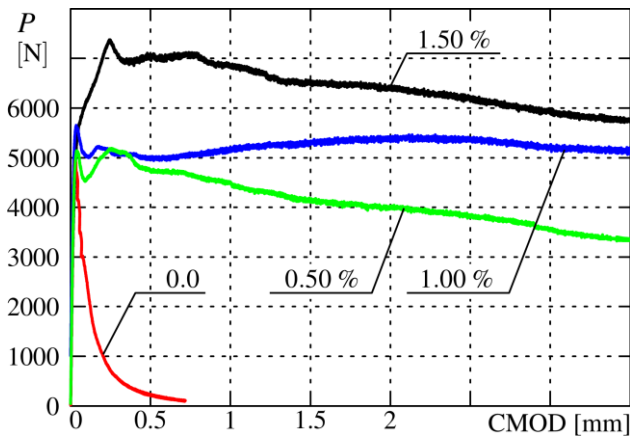


Fig. 5. Load P versus CMOD curves for concretes with various volume fraction of steel fibres.

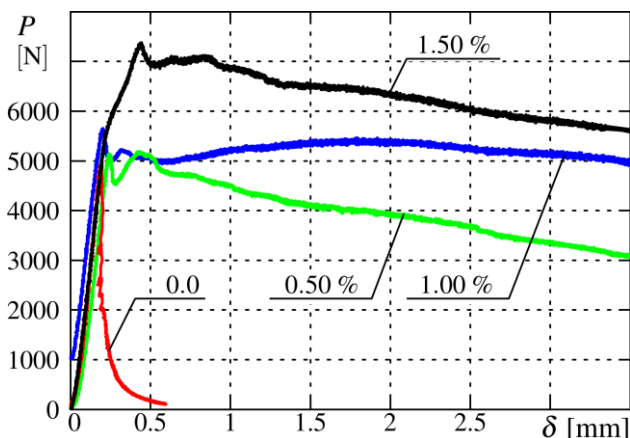


Fig. 6. Load P versus deflection δ of concretes with various volume fractions of steel fibres.

The influence of steel fibre addition expresses itself by reaching a higher maximum ultimate load, larger displacement, and thus a larger area under the load-displacement curve and consequently considerable greater fracture energy resulting in much more ductile behaviour of concrete. In a typical load vs. CMOD diagram of a specimen under three-point loading, the material exhibits linear behaviour up to its first crack stress (well marked first peak), a post-first-crack strain hardening phase up to its ultimate flexural load, and a post-ultimate-load phase. The descending parts of diagrams for concretes with different fibre dosage are characterized by apparent nonlinearity and significant scatter of test results. Both the strain softening and hardening were observed.

The hooked end steel fibres are typical example of “slipping fibres”. When a crack opens, the “slipping fibres” slip and never break. The stress transfer across the crack surfaces was closely related to the fibres debonding and pulling out. As microcracks grow and join into larger macrocracks, the long hooked-end fibres become more and more active in crack bridging. This type of fibres provide a very long plateau of post-crack residual strength (Vandewalle, 2008; Köksal et al., 2013).

The residual flexural tensile strength $f_{R,i}$, which is an important parameter characterising the post-cracking

behaviour of steel fibre reinforced concrete was determined on the basis of P -CMOD diagrams. The residual strengths $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ and $f_{R,4}$ respectively, were defined at the following CMODi: 0.5; 1.5; 2.5; 3.5 mm according to RILEM TC 162-TDF (2002) and EN14651 (2005) and presented in Table 4. The residual strength is a parameter considered in guidelines for concrete structure design (Model Code, 2012; RILEM TC 162-TDF, 2003) The hooked-end steel fibre are very effective in improving the post-peak parameters. The deformed shape provides better bond conditions. Of course, the residual strength is higher when the higher amount of fibre is added to the concrete mix and the variations of $f_{R,i}$ depend on the fibre content in concrete. In case of concrete reinforced with 0.5% of fibre the post-peak part of the load-CMOD diagram drops down while for higher fibre dosages it decreases very slowly. Vandewalle (2008) confirmed that the origin of the higher residual strength for long hooked-end fibres at larger CMOD values is twofold: presence of a hooked-end and long embedded length.

Tab. 4. Residual flexural strength of steel fibre reinforced concretes.

Parameter	CMOD (mm)	Steel fibre content (% vol.)		
		0.50	1.00	1.50
f_{R1} (MPa)	0.5	3.48 (0.42)	4.50 (0.41)	6.92 (0.53)
f_{R2} (MPa)	1.5	3.05 (0.36)	4.37 (0.32)	6.55 (0.57)
f_{R3} (MPa)	2.5	2.52 (0.35)	4.26 (0.49)	5.94 (0.41)
f_{R4} (MPa)	3.5	1.76 (0.26)	3.95 (0.39)	5.50 (0.51)

Standard deviations of the test results are presented in brackets.

Regarding the fracture energy G_F is the product of load and deflection, the variations of P - δ diagrams (Fig. 6) reflects the variations of G_F . In general, the concrete beam specimens containing steel fibres had higher energy absorption capacity than the plain concrete beam specimens. However, the energy absorption at the maximum load (area under the load-deflection curve) is almost similar for plain concrete specimens and specimens containing 0.5% and 1.0% of steel fibre. The added steel fibres have significant effect on total energy absorption (Table 5). Fig. 7 shows the average dissipated energy G_F versus CMOD for concretes containing steel fibres. The growth of G_F is linear and the differences in energy values, determined for particular volume fraction of fibres, become greater and greater when CMOD value increases.

Tab. 5. Mechanical properties of concretes with both sorts of fibres.

Sort of fibre	Fibre content (% vol.)	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Flexural strength (MPa)	Maximum load (N)	Max. load deflection (mm)	Total fracture energy (Nm/m ²)
non	0	53.0 (3.8)	28590 (1870)	3.53 (0.6)	4900 (110)	0.18	98 (5.8)
Basalt fibre	0.038	56.8 (2.0)	29775 (2322)	3.69 (0.3)	4930 (198)	0.22	116 (3.0)
	0.095	58.6 (0.9)	33500 (1940)	3.94 (0.2)	5570 (167)	0.26	133 (7.4)
	0.190	52.9 (4.2)	32830 (2310)	3.60 (0.4)	4850 (210)	0.42	171 (10.1)
Steel fibre	0.50	54.4 (2.3)	29860 (1560)	3.76 (0.3)	5240 (144)	0.20	1050 (80)
	1.00	55.1 (2.8)	30530 (2430)	5.49 (0.8)	5800 (169)	0.34	1930 (105)
	1.50	58.0 (1.7)	32110 (3208)	7.53 (1.1)	7050 (246)	0.45	2758 (206)

Standard deviations of the test results are presented in brackets.

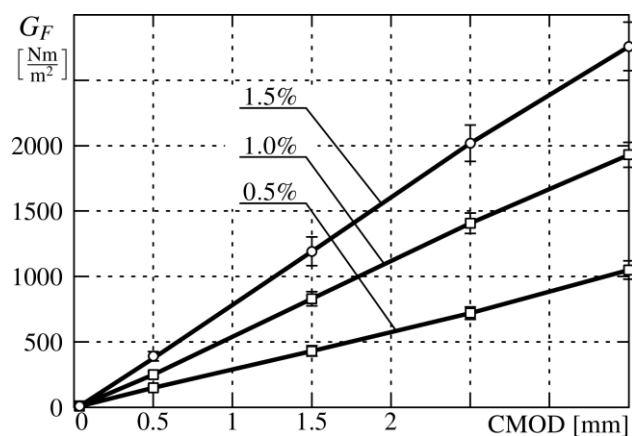


Fig. 7. Dissipated energy G_F versus CMOD for concretes with steel fibres.

3.3. Properties of fibre reinforced concrete

Mechanical properties of concretes containing two significantly different types of fibres were given in Table 5.

Basalt fibers improved the fracture toughness of concrete significantly, but these fibers had very little effect on strength characteristics of concrete. It should be marked that fibers do not significantly influence flexural tensile strength, as defined by the load capacity at first crack. The increases in both the flexural and compressive strength of basalt fibers were insignificant. The addition of fiber up to 0.19% (5 kg/m³) caused the slight reduction in compressive strength. Similar effect of higher dosage of basalt fibers was observed by Kabay (2014). The incorporation of fibers did not significantly improve the modulus of elasticity. The most significant changes in comparison to reference concrete were observed for fracture energy. The total fracture energy of concrete containing 0.19% of basalt fibres increased almost twice in comparison to the reference concrete without fibers. The deflection recorded for maximum load increased with the increased dosage of fibers, although the value of maximum load did not change significantly.

The incorporation of steel fibres, in considered volume fractions, had very slight influence on the compressive strength and modulus of elasticity, but steel fibres

appeared to increase the flexural strength almost twice (for concrete containing 1.5% of fibres) in comparison to reference concrete (see Table 5). The values of maximum load and the corresponding deflections increased with the fibre dosage increase. The total fracture energy depended on the fibre dosage and it achieved the values many times greater than fracture energy determined for basalt fibre reinforced concretes and reference concrete.

4. Conclusions

The influence of two different types of fibres on the fracture behaviour of cement concrete was analysed. The reference fine grained concrete was modified by incorporation of various dosages of basalt and steel fibres. There was showed that the load-CMOD and load-deflection curves, recorded in three-point bending test, can take quite different shapes depending on the geometry and mechanical properties of fibres. The influence of fibres is in enhancing the resistance to crack propagation resulting in an increase in composite toughness and it could be determined from load-CMOD or load-deflection measurement. Both types of fibres tested influence the fracture behaviour of concrete, but their effect on pre-peak and post-peak performance is different.

The incorporation of considered volume fraction (0.038-0.19%) of thin, soft basalt fibres had an influence on the fracture properties of concrete, while the fibers had a slight effect on the strength properties of concrete. The improvement of pre-peak and post-peak behavior was observed. The results of measuring the toughness and energy-absorption characteristics of fiber reinforced concrete, demonstrated that basalt fibres concrete specimens acquire better ductile behavior and energy absorption capacity, compared to ordinary concrete specimens. The variation in fracture parameters and the modifications of fracture curves, recorded under load, indicate the capability of the basalt fibres to resist crack propagation. Such significant changes in concrete behaviour should be taken into account in modelling and design of structures.

The stiff, hooked-end steel fibres (incorporated in the volume fraction of 0.5-1.5%) influenced concrete performance more efficiently than basalt fibres. The flexural tensile strength and the ductility increased with increasing fibre volume as expected. Steel fibres had relatively slight effect on pre-peak behaviour of concrete specimens. These parts of load-CMOD or load-deflection plot were more linear in comparison to plots obtained for basalt fibre reinforced concrete. In this phase the steel fibres were particularly effective in the elimination of influence of pores and other microstructure defects on concrete specimen behaviour under load. The stable post-peak performance at larger CMOD values was dominated by the volume of steel fibres due to the presence of the hooks and its large embedded length.

References

- ACI 544. IR-96 (1998). State-of-the-art report on fibre reinforced concrete. Manual of concrete practice. Farmington Hills.
- Bazant Z.P. (2002). Concrete fracture models: testing and practice. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 69, 165-205.
- Bordelon A.C. (2007). Fracture behavior of concrete materials for rigid pavements system. MA Thesis. Graduate College of University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
- Borhan T.M. (2012). Properties of glass concrete reinforced with short basalt fibre. *Materials and Design*, Vol. 42, 265-271.
- Buratti N., Mazzotti C., Savoia M. (2011). Post-cracking behaviour of steel and macro-synthetic fibre-reinforced concretes. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, 2713-2722.
- Dias D., Thaumaturgo C. (2005). Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 27, No. 1, 49-54.
- Di Lodovico M., Prota A., Manfredi G. (2010). Structural upgrade using basalt fibres for concrete confinement. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 14, No. 5, 541-552.
- EN 12390-3 (2011). Testing hardened concrete: Compressive strength of test specimens.
- EN 14651 (2005). Test method for metallic fibered concrete – measuring the flexural tensile strength.
- Garas V.Y., Kurtis K.E., Kahn L.F. (2012). Creep of UHPC in tension and compression: effect of thermal treatment. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 34, No. 4, 493-502.
- Kalpokaitė Dičkuviene R., Lukošiuūtė I., Brinkienė K., Baltušnikas A., Čėsniene J. (2013). Applicability of the waste fibres in cement paste. *Materials Science (Medžiagotyra)*, Vol. 19, No. 3, 331-226.
- Kabay N. (2014). Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber. *Construction and Building Materials*, Vol. 50, 95-101.
- Karihaloo B.L. (2003). *Failure of concrete*, in: *Comprehensive structural integrity*, Elsevier Pergamon, UK, 477-548.
- Kazemi M.T., Fazileh F., Ebrahiminezhad M.A. (2007). Cohesive crack model and fracture energy of steel-fiber-reinforced-concrete notched cylindrical specimens. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.19, No. 10, 884-890.
- Kosior-Kazberuk M. (2013). Variations in fracture energy of concrete subjected to cyclic freezing and thawing. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 13, 254-259.
- Kosior-Kazberuk M., Krassowska J. (2015). Post-cracking behaviour of basalt fibre reinforced concrete. *Proc. of the 6th International Conference on Mechanics and Materials in Design*, J.F. Silva Gomes, S.A. Meguid (Eds), P. Delgada, Azores, 26-30 July 2015, 673-682.
- Köksal F., Şahin Y., Gencil O., Yiğit İ. (2013). Fracture energy-based optimisation of steel fibre reinforced concretes. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 107, 29-37.
- Li W., Xu J. (2009). Mechanical properties of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete under impact loading. *Material Science Engineering A*, Vol. 505 No. 1-2, 178-186.
- Michels J., Christen R., Waldmann D. (2013). Experimental and numerical investigation on postcracking behavior of steel fiber reinforced concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 98, 326-349.
- Model Code 2010 (2012). Comité Euro-International du Béton fib (CEB-FIP).
- RILEM Draft Recommendation TC 50-FMC (1985). Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. *Materials and Structures*, Vol. 18, 285-290.
- RILEM TC 162-TDF (2002). Test and design method for steel fibre reinforced concrete. Bending test. Final recommendation. *Materials and Structures*, Vol. 35, 579-582.
- RILEM TC 162-TDF (2003). Test and design method for steel fibre reinforced concrete σ - ϵ design method. *Materials and Structures*, Vol. 36, 560-567.
- Shah S.P., Swartz S.E., Ouyang Ch. (1995). Fracture mechanics of concrete: Applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials. *John Wiley & Sons, Inc.*, New York.
- Sim J., Park C., Moon D. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 36, 504-512.
- Sorelli G., Meda A., Plizzari G.A. (2006). Steel fiber concrete slabs on ground: a structural matter. *ACI Structural Journal*, Vol. 103, No. 4, 551-558.
- Soutsos M.N., Le T.T., Lampropoulos A.P. (2012). Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres. *Construction and Building Materials*, Vol. 36, 704-710.
- Vandewalle L. (2008). Hybrid fibre reinforced concrete, In: *Harnessing fibres for concrete construction*, R.K. Dhir, M.D. Newlands, M.J. McCarthy, K. Paine (Eds), Proc. of the International Conference, University of Dundee, Scotland, UK, 10 July 2008, 11-22.
- Voit K., Kirnbauer J. (2014). Tensile characteristics and fracture energy of fiber reinforced and non-reinforced ultra high performance concrete (UHPC). *International Journal of Fracture*, Vol. 188, 147-157.
- Yoo D.-Y., Park, J.-J., Kim, S.-W., Yoon, Y.-S. (2013). Early age setting, shrinkage and tensile characteristics of ultra high performance fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 41, 427-438.
- Zhang P., Liu Ch., Li Q., Zhang T. (2013). Effect of polypropylene fiber on fracture properties of cement treated crushed rock. *Composites: Part B*, Vol. 55, 48-54.

**ZMIANY PARAMETRÓW MECHANIKI
PĘKANIA BETONÓW ZAWIERAJĄCYCH
WŁÓKNA BAZALTOWE I STALOWE**

Streszczenie: Badano wpływ włókien bazaltowych i stalowych na podkrytyczne i pokrytyczne zachowanie się elementów próbnych z betonu drobnoziarnistego. Wykresy zależności obciążenie-rozwarcie wylotu karbu oraz zależności obciążenie-ugięcie, uzyskane w warunkach trójpunktowego zginania próbek beleczkowych z karbem typu U, wykorzystano do analizy zmian parametrów mechaniki pęknięcia oraz obliczenia energii pęknięcia. Porównano właściwości wytrzymałościowe badanych betonów. Wykazano, że beton zbrojony włóknami bazaltowymi

charakteryzuje się zwiększoną odpornością na inicjację i propagację rys. Wprowadzenie włókien stalowych do betonu spowodowało znaczące zwiększenie energii pęknięcia, a także zmianę charakteru materiału w kierunku bardziej ciągliwego w porównaniu do betonu z dodatkiem włókien bazaltowych. Wskazano istotne różnice charakterystyk pęknięcia betonów z dodatkiem obu rodzajów włókien.

Acknowledgments

The research work was financially supported by National Science Centre (Poland); project No. 2011/03/B/ST8/06456.

METAKAOLINIT JAKO PUCOLANOWY DODATEK DO BETONU - PRZEGLĄD STANU WIEDZY

Dorota MAŁASZKIEWICZ*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: Mineralne dodatki do betonu stały się integralnym jego składnikiem. Zastępują one częściowo cement portlandzki, którego produkcja jest energochłonna i uciążliwa dla środowiska naturalnego. Wykorzystywane są materiały naturalne, odpady przemysłowe, produkty uboczne pochodzące z różnych gałęzi przemysłu lub inne materiały, których wyprodukowanie pochłania mniej energii niż produkcja cementu. W ostatnich latach odnotowuje się coraz większe zainteresowanie wykorzystaniem kalcynowanej gliny w postaci metakaolinitu (ang. *metakaolin*) jako pucolanowego dodatku do zapraw i betonów, który pozwala na poprawę parametrów mechanicznych i trwałość kompozytów cementowych. W artykule przedstawiono przegląd stanu wiedzy nad zastosowaniem metakaolinitu jako częściowego zamiennika cementu, szczególnie przydatnego w zaprawach i betonach narażonych na agresywne działanie środowiska. Badania świadczą o tym, że metakaolinit może być efektywnym dodatkiem poprawiającym mikrostrukturę, a tym samym trwałość betonu.

Słowa kluczowe: beton, metakaolinit, właściwości mieszanki betonowej, trwałość betonu.

1. Wprowadzenie

Według normy PN-EN 206:2014 *Beton - Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność* dodatkiem do betonu jest drobnoziarnisty materiał stosowany w celu poprawy pewnych właściwości betonu lub osiągnięcia właściwości specjalnych, i wyróżnia dwa typy dodatków:

- typ I – dodatki prawie obojętne,
- typ II – dodatki o właściwościach pucolanowych lub utajonych właściwościach hydraulicznych.

Dodatki zostały zastosowane w technologii betonu z kilku powodów: poprawienie pewnych właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego betonu, utylizacja odpadów przemysłowych oraz zmniejszenie zużycia cementu. Przemysł cementowy odpowiada za około 5% światowej emisji CO₂. Wyprodukowanie 1 tony klinkieru portlandzkiego uwalnia około 815 kg CO₂, z czego 425 kg pochodzi z rozpadu kamienia wapiennego – głównego surowca stosowanego w produkcji cementu, a 390 kg ze spalania paliwa. (Gartner, 2014). Do atmosfery uwalniane są również SO₃ i NO_x, które mogą powodować efekt cieplarniany i kwaśne deszcze. W celu zmniejszenia tego negatywnego wpływu na środowisko naturalne stosuje się różnego rodzaju dodatki mineralne, którymi zastępuje się w betonie część cementu bądź jako składnik cementu zastępujący częściowo klinkier.

Dodatki pucolanowe, czyli drobno zmielone materiały glinokrzemianowe, stosowali już Rzymianie, na przykład popioły wulkaniczne lub rozdrobnione płytki ceramiczne.

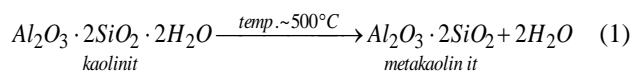
Dodatek z wypalanej gliny powrócił obecnie w postaci metakaolinitu. Artykuł dotyczy wyników badań wpływu tego dodatku na właściwości reologiczne mieszanek betonowych oraz parametry mechaniczne i trwałość stwardniałego betonu przedstawione w literaturze naukowej. Przegląd stanu wiedzy w tym obszarze poprzedza prezentację wyników prowadzonych obecnie badań własnych.

2. Parametry techniczne metakaolinitu

Materiałem charakteryzującym się wysoką pucolanowością jest metakaolinit – minerał powstający w procesie prażenia w temperaturze 700-900 °C naturalnego kaolinitu (Kurdowski, 2010).

Kaolinit jest minerałem ilastym o budowie pakietowej dwuwarstwowej. Wzór krystalochemiczny kaolinitu ma postać $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$. Podstawowy element strukturalny kaolinitu zbudowany jest z pakietu, w skład którego wchodzi warstwa tetraedryczna krzemowo-tlenowa oraz z oktaedryczna glinowo-tlenowo-wodorotlenowa. Teoretyczny skład chemiczny kaolinitu to: 46,54% SiO₂, 39,5% Al₂O₃ i 13,96% H₂O. Dehidroksylacja kaolinitu zachodzi już w temperaturze 550 °C (Kurdowski, 2010), a proces ten można opisać równaniem:

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: d.malaszkievicz@pb.edu.pl



Powyższa reakcja endotermiczna zmienia strukturę krystaliczną kaolinitu.

Rashad (2013a) porównuje czasy i temperatury prażenia podawane przez wielu badaczy. Większość z nich podaje zakres temperatur 650-850 °C, jako optymalny. Temperatura prażenia ma wpływ na aktywność pucolanową otrzymanego produktu. Pod wpływem temperatury przekraczającej 900 °C metakaolinit ulega spieczeniu, powstaje mullit, który jest składnikiem inertnym.

Według Badogiannisa i in. (2005) surowcom ubogim w kaolinit wystarczy prażenie w temperaturze 650 °C przez 3 godziny – wytwarzane w tych warunkach wykazują najwyższe pucolanowe właściwości; natomiast surowiec bogaty w gliniany wymaga prażenia w temperaturze 850 °C przez 3 godziny w celu usunięcia niepożądanego SO₃.

Wytwarzanie metakaolinitu jest procesem mniej energochłonnym niż produkcja cementu, ponieważ zarówno temperatura jak i czas wypalania są niższe. Według San Nicolas (2013) wyprodukowanie jednej tony metakolinitu pochłania około 80% mniej energii w porównaniu do wytwarzania cementu.

Dodatki pucolanowe stosowane są w technologii betonu ze względu na ich zdolność do wiązania wodorotlenku wapnia (CH), który jest produktem hydratacji cementu i który częściowo odpowiada za obniżenie trwałości betonu. Obniżenie zawartości CH znacząco poprawia odporność betonu na agresję siarczanową i reakcję alkalia-kruszywo oraz poprawia wytrzymałość mechaniczną dzięki zwiększeniu zawartości fazy C-S-H jako produktu reakcji CH z pucolaną.

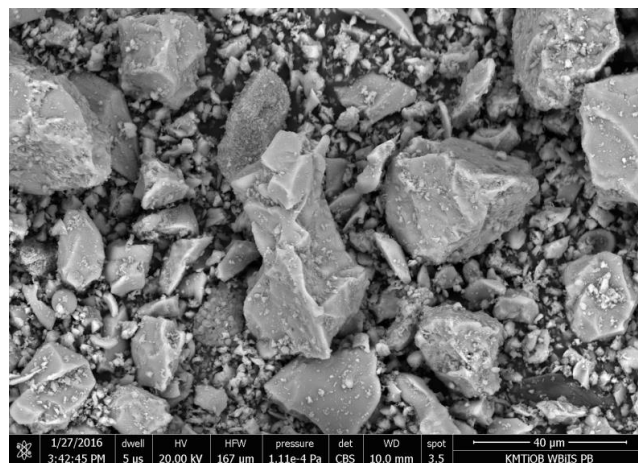
W latach 1962-1972 około 230 tysięcy ton kalcynowanej kaolinitowej gliny zastosowano do betonu wykorzystanego do budowy czterech elektrowni wodnych w Brazylii. Po kilkunastu latach eksploatacji nie zaobserwowano (Saad i in., 1982) korozji w wyniku reakcji alkalia-kruszywo, pomimo zastosowania kruszywa o wysokiej reaktywności. Trwałość konstrukcji przypisuje się właśnie zastosowaniu w betonie kalcynowanej gliny.

Metakaolinit jest materiałem drobnoziarnistym, 99,9% ziaren ma wielkość poniżej 16 μm, przy czym średnia ich wielkość wynosi 3 μm (Siddique i Klaus, 2009). Jego barwa zależy od surowca zastosowanego w produkcji – czyli od rodzaju złoża. Porównanie właściwości fizycznych wybranych dodatków mineralnych przedstawiono w tabeli 1.

Jak wynika z danych zamieszczonych w tabeli 1 metakaolinit i pył krzemionkowy mają zbliżoną powierzchnię właściwą, pomimo znacznej różnicy w wielkości pojedynczych ziaren. Pył krzemionkowy ma postać szklistych, zbliżonych do sferycznych, ziaren o średnicy w większości poniżej 0,1 μm. Ziarna metakaolinitu natomiast bardziej przypominają płatki o nieregularnej i znacząco rozwiniętej powierzchni.

Głównymi składnikami metakaolinitu są dwutlenek krzemu (SiO₂) i tlenek glinu (Al₂O₃). Pozostałe tlenki stanowią niewielki udział w ogólnej masie. Przykładowe składy chemiczne cementu portlandzkiego, metakaolinitu oraz innych dodatków do betonu przedstawiono w tabeli 2.

Na rysunkach 1-3 przedstawiono obrazy SEM cementu portlandzkiego CEM I 42,5R, popiołu lotnego krzemionkowego oraz metakaolinitu.



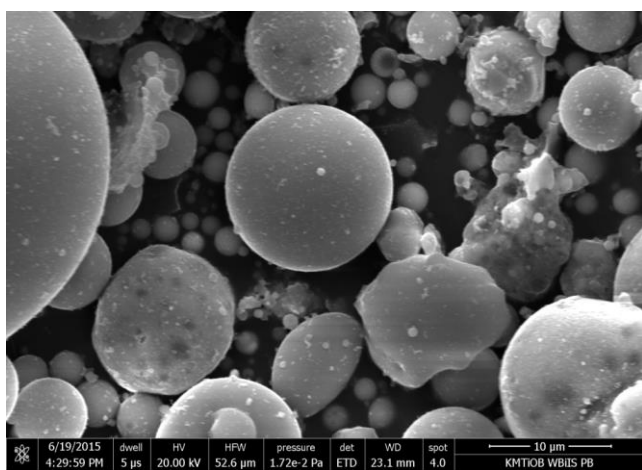
Rys. 1. Obraz SEM cementu portlandzkiego CEM I 42,5R (źródło własne)

Tab. 1. Porównanie właściwości fizycznych dodatków mineralnych (Siddique i Klaus, 2009; Neville, 2012)

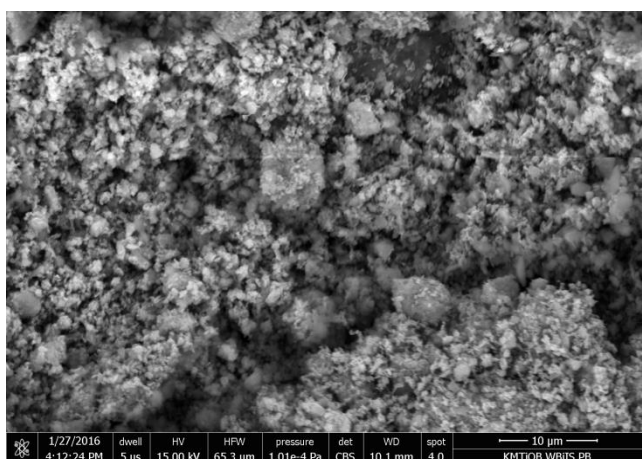
Cecha	Metakaolinit MK	Popiół lotny PL	Pył krzemionkowy PK	Mielony granulowany żużel wielkopiecowy
Gęstość, g/cm ³	2,60	2,35	2,20	2,90
Gęstość nasypowa, g/cm ³	0,3-0,4		0,5-0,7	
Wielkość ziaren, μm	1-16	1-100	0,03-0,3	<50
Powierzchnia właściwa, m ² /kg	12000-15000	250-600	20000	350-500
Kształt ziarna	nieregularny	kulisty	kulisty	nieregularny

Tab. 2. Przykładowy skład chemiczny cementu portlandzkiego (Neville, 2012), mielonego granulowanego żużla wielkopiecowego (Jończy i Lata, 2013), metakaolinitu (Ambrose i in., 1994; Wild i Khatib, 1997; Taffraoui i in., 2009), popiołu lotnego (Giergiczny, 2007) oraz pyłu krzemionkowego (Holtzer i in., 2003)

Składnik	CEM I	MGŻW	PL	PK	MK		
	% masowo						
SiO ₂	17÷25	39,57	51,5	92,8	51,52	52,10	58,10
Al ₂ O ₃	3÷8	10,30	27,8	0,48	40,18	41,10	35,14
Fe ₂ O ₃	0,5÷6,0	17,77	7,5	2,20	1,23	4,32	1,21
CaO	60÷67	19,24	4,0	0,29	2,0	0,07	1,15
MgO	0,5÷4,0	5,63	2,5	0,21	0,12	0,19	0,20
Na ₂ O+K ₂ O	0,3÷1,2	0,51	4,1		0,61	0,89	1,12
SO ₃	2,0÷3,5		0,7		0,0	0,0	0,03
TiO ₂		0,59			0,02	2,27	0,81
Straty prażenia		5,82	2,2		3,5	2,01	0,60



Rys. 2. Obraz SEM popiołu lotnego krzemionkowego (źródło własne)



Rys. 3. Obraz SEM metakaolinitu (źródło własne)

O ile w normalizacji europejskiej ujęte są takie dodatki jak popiół lotny (PN-EN 450-1:2012 *Popiół lotny do betonu - Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria zgodności*), mielony granulowany żużel wielkopiecowy (PN-EN 15167-1:2007 *Mielony granulowany żużel wielkopiecowy do stosowania w betonie, zaprawie i zaczynie - Część 1: Definicje, specyfikacje i kryteria*

zgodności) czy pył krzemionkowy (PN-EN 13263-1+A1:2010 *Pył krzemionkowy do betonu - Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności*), to nie ma wymagań normowych w stosunku do metakaolinitu jako materiału, który może być stosowany do zaczynów, zapraw bądź betonów cementowych. Materiał ten obecnie nie jest znormalizowanym dodatkiem ujętym w normie PN-EN 206:2014. Wymagania takie zostały przykładowo ujęte w normie amerykańskiej ASTM C618-15 (tab. 3).

Tab. 3. Wymagania dla metakaolinitu według ASTM C 618-15

Wymaganie	Wartość graniczna
Zawartość SiO ₂ , Al ₂ O ₃ i Fe ₂ O ₃	Min. 85%
Zawartość alkaliów	maks. 1,0%
Straty prażenia	maks. 3,0%
Pozostałość na sicie 45 µm, przesiewanie na mokro	maks. 1,0%
Wskaźnik aktywności po 7 dniach (w stosunku do próbki kontrolnej)	85%
Skurcz wysychania badany na beleczkach z zaprawy po 28 dniach	Maks. 0,03%

3. Wpływ metakaolinitu na hydratację zaczynu

Metakaolinit zawiera reaktywne krzemiany i gliniany (AS₂), które w obecności wody reagują z portlandytem CH będącym produktem hydratacji cementu, w wyniku czego powstaje żelowa faza C-S-H oraz fazy krystaliczne zawierające glin, takie jak C₄AH₁₃, C₂ASH₈ i C₃AH₆ (Changling i in., 1995; Zhang i Malhotra, 1995). Reakcja przebiega szybko i już po 3 dniach można wykryć rentgenograficznie obecność tych faz. Budowa krystalicznych produktów zależy głównie od stosunku AS₂/CH i temperatury, w której zachodzi reakcja (Murat, 1983).

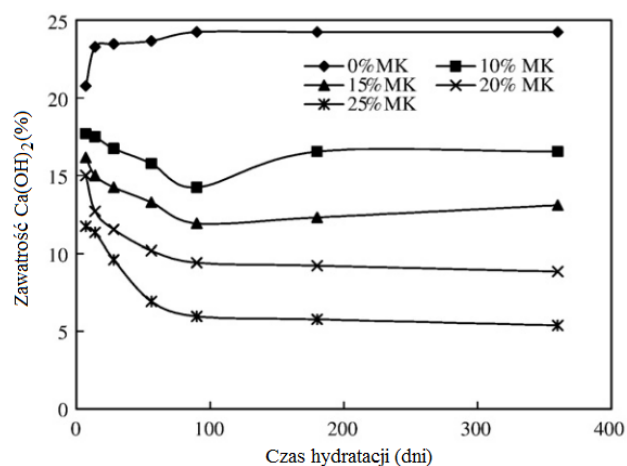
Reaktywności metakaolinitu zależna jest od parametrów zastosowanych przy jego wytwarzaniu

(temperatura i czas wypalania), od czystości surowca oraz stopnia rozdrobnienia. Wpływ może mieć również skład zastosowanego cementu, a w szczególności proporcje alit/belit (Wala i Rosiek, 2003). W tabeli 4 porównano reaktywność dodatków pucolanowych mierzoną tak zwanym testem Chapelle'a (Kostuch i in., 1993) czyli stopniem przereagowania CH na 1 g pucolany w warunkach podwyższonej temperatury.

Tab. 4. Aktywność pucolanowa dodatków do betonu (Asbridge i in., 2001).

Pucolana	Reaktywność, mg Ca(OH) ₂ /g pucolany
Pył krzemionkowy	427
Popiół lotny	875
Metakaolinit	1050

Frias i Cabrera (2000) określili stopień hydratacji zaczynów, w których cement zastępowano metakaolinitem w ilości 10%, 15%, 20% i 25% masowo przy stałym w/s = 0,55. Stopień hydratacji wyrażono całkowitą zawartością CH w stwardniałym zaczynie. Badanie prowadzono do 360 dni. Wyniki przedstawia wykres na rysunku 4. Po około 7 dniach twardnienia następuje spadek zawartości CH w zaczynach zawierających metakaolinit. Przy zawartości dodatku 10% i 15% obserwuje się zmianę przebiegu wykresu po 90 dniach twardnienia, kiedy to następuje wzrost zawartości wodorotlenku wapnia. Punkty zmiany przebiegu wykresu odpowiadają zakończeniu reakcji pucolanowej ze względu na wyczerpanie się w systemie metakaolinitu.



Rys. 4. Zmiana zawartości wodorotlenku wapnia w funkcji czasu (Frias i Caberra, 2000)

4. Wpływ metakaolinitu na właściwości reologiczne zaczynów, zapraw i mieszanek betonowych.

Wraz ze wzrostem dozowania MK w stosunku do masy cementu obserwuje się spadek konsystencji mieszanki betonowej, a co za tym idzie pogorszenie urabialności oraz wydłużenie czasu wiązania.

Kadri i in. (2011) badali rozplływ zapraw cementowych z dwoma rodzajami metakaolinitu o różnym stopniu rozdrobnienia i z pyłem krzemionkowym. Wszystkie dodatki dozowano w ilości 10% masy cementu. W celu osiągnięcia takiego samego rozplwywu (210±10 mm) zaprawy z pyłem krzemionkowym i metakaolinitem o większej powierzchni właściwej wymagały o 68% więcej superplastyfikatora, a zaprawa z metakaolinitem o mniejszej powierzchni właściwej odpowiednio 46% więcej domieszki w stosunku do zaprawy kontrolnej.

Subasi i Emiroglu (2015) nie zaobserwowali wzrostu zapotrzebowania na wodę do osiągnięcia takiej samej konsystencji zaczynu, jak zaczyn kontrolny, przy zastąpieniu cementu metakaolinitem w ilości do 15%. Próbkę, w których zastąpiono 20%, 25% i 30% cementu wymagały zwiększenia dozowania wody zarobowej o odpowiednio 3%, 3% i 6%.

Sonebi i in. (2013) zaobserwowali, że przy takim samym dozowaniu superplastyfikatora i domieszki modyfikującej lepkość (VMA) do zaczynów cementowych, wraz ze wzrostem zawartości metakaolinitu rośnie czas wypływu ze stożka Marsha, granica płynięcia oraz lepkość plastyczna, zmniejsza się natomiast wielkość rozplwywu badana mini-stożkiem.

Sfikas i in. (2014) badali reologiczne właściwości SCC, w których cement bądź mączkę wapienną zastępowano metakaolinitem odpowiednio do maksymalnie 20% i 40% masowo. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem dozowania metakaolinitu zarówno w stosunku do cementu jak i mączki wapiennej należało zwiększyć ilość superplastyfikatora w celu osiągnięcia takich samych cech reologicznych mieszanki. Zjawisko to należy tłumaczyć większą powierzchnią właściwą i nieregularnym płytkowym kształtem cząstek metakaolinitu. Lepkość wyrażona czasem wypływu V-funnel wzrasta niezależnie od tego, jaki materiał był zastępowany metakaolinitem, ale efekt ten był silniejszy przy zastępowaniu cementu. Nie zaobserwowano wycieku mleczka cementowego (*bleeding*) ani problemów z segregacją składników SCC.

Właściwość SCC, w którym cement zastępowano metakaolinitem (5%, 10%, 15% i 20%), zbadali również Madandoust i in. (2012) przy współczynnikach woda:spoiwo (w/s) równych 0,32; 0,38 i 0,45. We wszystkich przypadkach należało znacząco zwiększyć dozowanie superplastyfikatora w celu uzyskania rozplwywu w przedziale 660-715 mm. Dozowanie to wzrosło z 2,47% do 9,96% (sic!), z 1,73% do 4,89% i z 1,63% do 3,91% odpowiednio dla w/s równego 0,32; 0,38 i 0,45. Maksymalne wartości dozowania superplastyfikatora podano dla 15% zastąpienia cementu metakaolinitem. Pomimo uzyskania zadowolających rozplwywów, wraz ze wzrostem dozowania metakaolinitu znacząco wzrósł czas T500 i czas wypływu mieszanki V-funnel. W przypadku w/s = 0,35 czasy wzrosły odpowiednio z 2,48 s do 7,97 s oraz z 6,1 s do 37,1s, przy w/s = 0,38 odpowiednio z 1,90 s do 6,56 s oraz z 5,2 s do 27,1 s, a przy w/s = 0,45 z 1,30 s do 4,08 s oraz z 5,0 s do 12,9 s. W celu stabilizacji mieszanki (brak bleedingu

i segregacji) do mieszanek bez metakaolinitu należało stosować domieszkę modyfikującą lepkość (przy wszystkich poziomach współczynnika w/s). Natomiast mieszanki z metakaolinitem wykazywały odpowiednią stabilność bez konieczności stosowania tej domieszki.

Wpływ zastąpienia cementu metakaolinitem w ilości 5%, 10% i 15% na wielkość opadu stożka i czas wiązania zbadali Brooks i Johari (2001). Wyniki ich badań zestawiono w tabeli 5. Zastąpienie części cementu metakaolinitem znacząco wpłynęło na konsystencję mieszanki betonowej mierzoną opadem stożka, wydłużeniu uległ zarówno początek jak i koniec wiązania.

Tab. 5. Konsystencja i czasy wiązania betonu z dodatkiem metakaolinitu (Brooks i Johari, 2001)

Skład	Opad stożka (mm)	Początek wiązania (h)	Koniec wiązania (h)
CEM I	100	5,0	7,7
MK5	30	6,42	8,82
MK10	20	6,98	9,42
MK15	5	6,45	9,31

Bai i in. (2003) zastosowali sieci neuronowe w celu przewidywania urabialności mieszanek betonowych zawierających metakaolinit (do 15% masy cementu) i popiół lotny (do 40% masy cementu). Modelowanie okazało się wiarygodne i dokładne. Obrazuje ono, jak sieci neuronowe mogą być wykorzystane do efektywnego przewidywania konsystencji mieszanki mierzonej opadem stożka, wskaźnikiem zagęszczenia oraz czasem Vebe przy szerokim zakresie zmienności składu spoiwa CEM-PL-MK.

Wpływ dodatków w postaci metakaolintu, szamotu uzyskanego ze zmielenia cegły odpadowej i naturalnej pucolany ze skały pochodzenia wulkanicznego na właściwości reologiczne zapraw i betonów badali Mansour i in. (2013). Zastosowanie metakaolinitu i pucolany spowodowało znaczny wzrost lepkości plastycznej oraz podwyższenie granicy płynięcia w stosunku do betonu porównawczego. Nie zaobserwowano natomiast pogorszenia urabialności zaprawy i betonu po dodaniu szamotu.

Gołaszewski i in. (2005) zaobserwowali, że na właściwości reologiczne zapraw z metakaolinitem ma wpływ zawartość C_3A i Na_2O_{eq} w cemencie oraz rodzaj zastosowanego superplastyfikatora. Projektując betony z tym dodatkiem należałoby więc również brać pod uwagę aspekt kompatybilności układu cement-metakaolinit-superplastyfikator.

5. Wpływ metakaolinitu na właściwości stwardniałej zaprawy oraz betonu

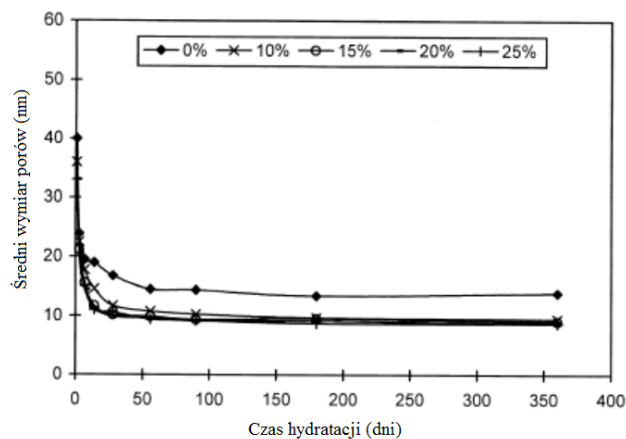
5.1. Porowatość

Kostuch i in. (1993) badali wpływ metakaolinitu na mikrostrukturę i właściwości dyfuzyjne zaczynów.

Odnotowano znaczący spadek średniego wymiaru porów przy zastąpieniu cementu 20% metakaolinitu, jak również zmniejszenie wskaźnika dyfuzji jonów Cl^- i Na^+ oraz nasiąkliwości zapraw.

Khatib i Wild (1996) zbadali objętość i rozkład porów zaczynów cementowych, w których cement zastępowano metakaolinitem w ilości 0%, 5%, 10% i 15%, przy stałym współczynnikiem wodno-spoiwowym ($w/s = 0,55$). Zaobserwowano zmniejszenie wielkości porów w zaczynach z mieszanym spoiwem. Udział porów poniżej 20 nm zwiększył się zarówno wraz ze wzrostem dozowania metakaolinitu, jak również wraz z długością pielęgnacji. Całkowita porowatość zmniejszała się systematycznie wraz z czasem w zaczynach zawierających wyłącznie cement jako spoiwo. W zaczynach z metakaolinitem zaobserwowano nieznaczny wzrost porowatości między 14 i 28 dniem twardnienia, czemu towarzyszył wzrost zawartości wodorotlenku wapnia. Zjawisko to przypisano dwóm czynnikom. Po pierwsze tworzeniu się inhibitującej warstwy z produktów reakcji redukcji na ziarnach metakaolinitu i tym samym zakończeniu reakcji między metakaolinitem a CH oraz uniemożliwieniu dalszego tworzenia się żelu blokującego pory. Inny możliwy powód to przekształcenie C_2ASH_8 i C_4AH_{13} o mniejszej gęstości w hydrogranaty o większej gęstości. Tej zmianie może towarzyszyć spadek objętości fazy stałej i tym samym wzrost porowatości oraz brak wzrostu wytrzymałości. Oba wyżej wymienione zjawiska mogą występować jednocześnie. Całkowita porowatość nieznacznie wzrosła wraz ze zwiększeniem dozowania metakaolinitu.

Frias i Cabrera (2000) ocenili wpływ metakaolinitu na rozkład porów w zaczynach zawierających 0%, 10%, 15%, 20% i 25% tego dodatku. Po 24 godzinach twardnienia wszystkie zaczyny miały podobną porowatość (49-50%). Zaczyny zawierające metakaolinit wykazały się większą całkowitą porowatością w porównaniu do zaczynu cementowego, wzrost ten wyniósł około 16%. Po zastąpieniu części cementu przez metakaolinit zmniejszył się natomiast średni wymiar porów, co przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Średni wymiar porów w zależności od czasu hydratacji i ilości metakaolinitu (Frias i Cabrera, 2000)

Między 7 a 90 dniem twardnienia porowatość żelowa (wielkość porów poniżej 100 Å) zaczynów z metakaolinitem wzrosła, podczas gdy w zaczynach z samym cementem praktycznie nie uległa zmianie. Badania wykazały, że konieczne jest dozowanie metakaolinitu w ilości minimum 15-20% masy cementu aby uzyskać znaczącą poprawę struktury porowatości i zmniejszyć średni wymiar porów (rys. 5). Autorzy nie odnotowali wzrostu zawartości wodorotlenku wapnia między 14 i 18 dniem twardnienia, a w związku z tym nie stwierdzono w tym okresie wzrostu całkowitej porowatości.

Duan i in. (2013) badali porowatość betonów z metakaolinitem (10%) po 3, 7, 28 i 180 dniach twardnienia. Całkowita porowatość i wielkość porów badana po różnych czasach twardnienia w betonie zawierającym metakaolinit była niższa w stosunku do betonu kontrolnego. Świadczy o tym, że dodatek wpłynął pozytywnie na charakterystykę porowatości betonu.

Te różnice w wynikach przytoczonych badań poszczególnych autorów mogą być przypisane różnicom w składzie i rozdrobieniu zastosowanych cementów i metakaolinitów.

Przytoczone wyniki badań jednoznacznie świadczą o tym, że dodatek w postaci metakaolinitu modyfikuje porowatość zaczynów, zapraw i betonów cementowych i znacząco poprawia odporność matrycy na transport wody i dyfuzję szkodliwych jonów, które mogą prowadzić do jej degradacji.

5.2. Skurcz chemiczny i autogeniczny

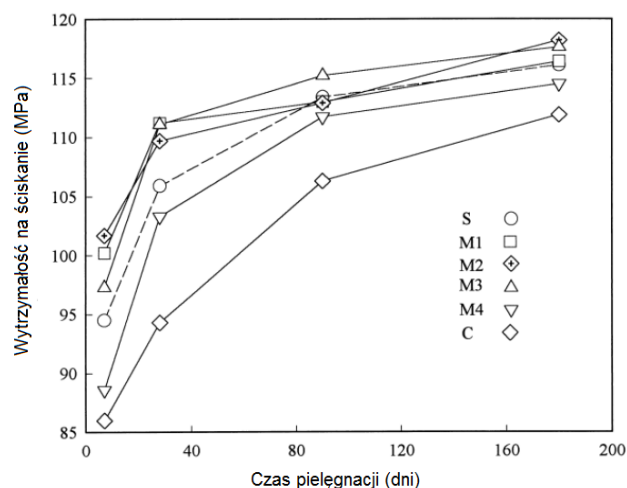
Wild i in. (1996) badali skurcz chemiczny i autogeniczny zaczynów zawierających 5-25% metakaolinitu w stosunku do masy cementu w okresie między 1 a 45 dniem twardnienia. Przy dozowaniu metakaolinitu do 10% zaobserwowano wzrost skurczu autogenicznego niezależnie od czasu hydratacji, natomiast obniżył się on przy wzroście dozowania dodatku. Zaobserwowaną maksymalną wartość skurczu (10% MK) przypisano optymalnej kombinacji efektu hydratacji cementu i reakcji pucolanowej, które to spowodowały usunięcie wolnej wody z systemu. Skurcz chemiczny osiągnął wartość maksymalną przy dozowaniu metakaolinitu między 10% i 15%, przy większej zawartości metakaolinitu nastąpił gwałtowny spadek skurczu. Autorzy wyjaśniają

te zjawiska tworzeniem się większej ilości C_2ASH_8 i zmniejszeniem zawartości C_4AH_{13} wraz ze wzrostem udziału metakaolinitu.

5.3. Wytrzymałość kompozytów cementowych

Liczne badania dotyczące rozwoju wytrzymałości zapraw i betonów zawierających metakaolinit świadczą o tym, że przy odpowiednim dozowaniu tego dodatku można uzyskać poprawę właściwości mechanicznych, szczególnie we wczesnych okresach twardnienia (Ramezianpour i Jovein, 2012; Mardani-Aghabaglou i in., 2014; Duan i in., 2013). Ze względu na wytrzymałość długoterminową optymalny poziom zastąpienia cementu przez metakaolinit szacowany jest na 20% (Wild i in., 1996), co przedstawia tabela 6. Autorzy identyfikują trzy podstawowe czynniki odpowiedzialne za rozwój wytrzymałości na ściskanie betonu przy częściowym zastąpieniu cementu metakaolinitem: efekt wypełnienia, przyspieszenie hydratacji cementu, co ma miejsce w pierwszych 24 godzinach oraz reakcja pucolanowa metakaolinitu z CH, której maksimum przypada między 7 a 14 dniem twardnienia.

Curcio i in. (1998) badali rozwój wytrzymałości zapraw, w których 15% cementu zastępowano czterema różnymi metakaolinitami (różniącymi się pochodzeniem i stopniem rozdrobnienia) oraz pyłem krzemionkowym. Wyniki ich badań przedstawia wykres na rysunku 6.



Rys. 6. Rozwój wytrzymałości na ściskanie zapraw w zależności od czasu twardnienia i rodzaju dodatku (Curcio i in., 1998): M1-4 – metakaolinit, S – pył krzemionkowy, C – cement

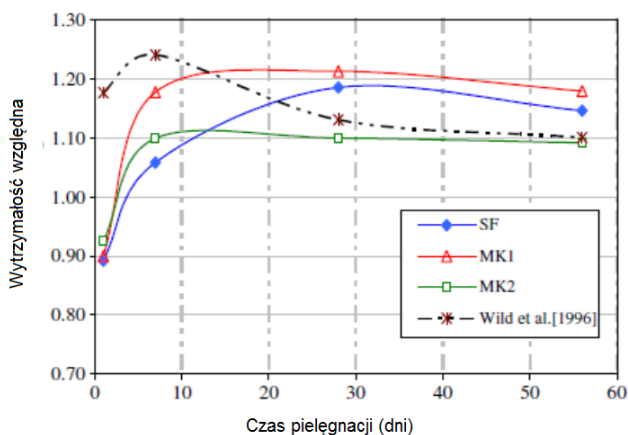
Tab. 6. Wytrzymałość na ściskanie i gęstości betonów z metakaolinitem (Wild i in., 1996)

Metakaolinit %	Gęstość kg/m^3	Wytrzymałość na ściskanie, N/mm^2				
		1 dzień	7 dni	14 dni	28dni	90 dni
0	2490	19,07	50,23	57,10	62,60	72,43
5	2440	21,50	53,80	58,97	63,50	71,63
10	2460	22,43	62,30	69,23	71,00	80,07
15	2470	20,23	64,80	74,67	76,00	83,70
20	2480	19,33	66,47	75,73	82,47	85,13
25	2470	15,73	62,50	69,77	73,93	82,23
30	2480	14,53	60,53	72,33	76,73	81,80

Wytrzymałość zapraw z metakaolinitem była w niektórych przypadkach nawet wyższa, niż zapraw z pyłem krzemionkowym. Badania wykazały, że wszystkie zaprawy z metakaolinitem osiągnęły maksimum aktywności pucolanowej do 28 dnia twardnienia. Po 90 i 180 dniach próbki z metakaolinitem i pyłem krzemionkowym mają podobną wytrzymałość na ściskanie.

Mermerdas i in. (2012) badali wpływ metakaolinitu i kalcynowanych kaolinów na rozwój wytrzymałości na ściskanie betonów. Stwierdzono, że kalcynowane kaoliny pozyskane z nieprzetworzonych tureckich kaolinów wykazują podobne działanie, jak dostępny na rynku metakaolinit. Betony modyfikowane dodatkami wykazywały wyższe wytrzymałości na ściskanie nawet we wczesnych okresach twardnienia. Optymalne dozowanie kalcynowanego kaolinu wyniosło 15% masy cementu. Udowodniono statystycznie, że na wytrzymałość mają wpływ następujące parametry: skład i stopień rozdrobnienia dodatku, wiek betonu oraz poziom dozowania.

Kadri i in. (2011) badali wpływ metakaolinitów o różnej powierzchni właściwej (MK1 – 19 m²/g i MK2 – 17 m²/g) i bardzo zbliżonym składzie chemicznym oraz pyłu krzemionkowego (SF – 18,2 m²/g) na właściwości zapraw. Na rysunku 7 przedstawiono względną wytrzymałość (w porównaniu z wytrzymałością zapraw bez żadnego dodatku) zapraw modyfikowanych dodatkami w poszczególnych okresach twardnienia. Wykres porównuje również rezultaty otrzymane przez Wild i in. (1996) przy 10% dozowaniu metakaolinitu. Wprowadzenie metakaolinitu wpływa szczególnie korzystnie na wytrzymałość na ściskanie podczas pierwszych 14 dni twardnienia. Po tym okresie dodatek nie powoduje wzrostu wskaźnika rozwoju wytrzymałości. Spadek względnej wytrzymałości po 7 dniach twardnienia zaobserwowany przez Wild i in. (1996) może być podyktowany tym, że te badania były przeprowadzone na betonach o znacznie wyższym w/s = 0,45 i znacznie niższej zawartości spoiwa (350 kg/m³) w porównaniu do badań Kadri i in. (2011) – zaprawy o w/s = 0,36, zawartość spoiwa 680 kg/m³.



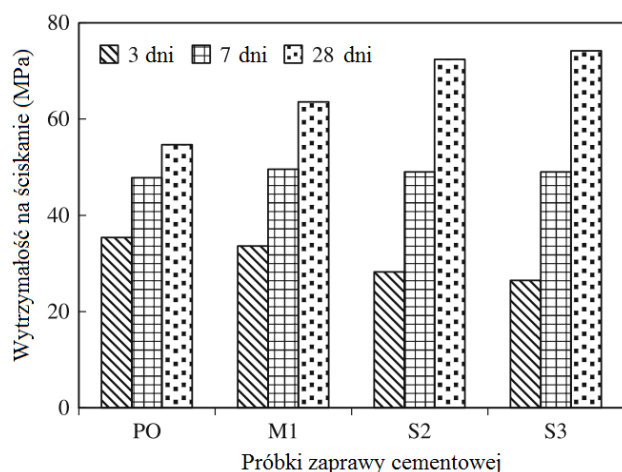
Rys. 7. Zależność wytrzymałości względnej od czasu twardnienia (Kadri i in., 2011)

Subasi i Emiroglu (2015) badali wpływa metakaolinitu na wytrzymałość na ściskanie i zginanie zapraw normowych z białym cementem, w których dozowano metakaolinit do 30% masy cementu. W tych badaniach obie wytrzymałości we wszystkich terminach badawczych (do 90 dni) były niższe dla próbek z dodatkiem w porównaniu do próbek kontrolnych. Spadek był tym większy im wyższe było dozowanie metakaolinitu. Należy zaznaczyć, że skład chemiczny zastosowanego w tych badaniach metakaolinitu znacznie różnił się od składu dodatków stosowanych przez innych badaczy: SiO₂ – 35,62%, Al₂O₃ – 11,11%, Fe₂O₃ – 0,29%, CaO – 24,19%.

Badogiannis i in. (2004) badali wytrzymałość na ściskanie betonów zawierających termicznie aktywowany w temperaturze 650 °C przez 3 godziny grecki kaolin o niskiej zawartości kaolinitu lub dostępny na rynku metakaolinit. Dodatki wprowadzono jako substytut cementu lub drobnego kruszywa (odpowiednio 10% i 20% masowo). Uzyskano wyższe wytrzymałości na ściskanie przy zastąpieniu piasku metakaolinitem w porównaniu do betonu kontrolnego i do betonu, w którym cement zastąpiono częściowo metakaolinitem. Badogiannis i Tsivilis (2009) zastępowali cement bądź piasek metakaolinitem w betonach wysokowartościowych. Zauważyli, że beton z metakaolinitem miał nie tylko wyższe wytrzymałości, ale również wykazał się niższą przepuszczalnością jonów chlorkowych, gazoprzepuszczalnością i miał niższą sorpcję.

Rashad (2013b) zbadał wpływ częściowego zastąpienia metakaolinitem kruszywa drobnego na wytrzymałość i odporność na ścieranie betonu. Piasek był zastępowany metakaolinitem w ilości 10%, 20%, 30%, 40% i 50% masowo. Wyniki badań wykazały że wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu i odporność na ścieranie wzrastały wraz ze wzrostem dozowania metakaolinitu do 40% masy piasku. Spadek tych parametrów nastąpił przy dozowaniu 50%. Ścieralność poprawiła się o około 23%, 36% i 46% w stosunku do betonu kontrolnego po odpowiednio 28, 91 i 500 dniach twardnienia przy zastąpieniu piasku 40% metakaolinitu.

Li i Ding (2003) badali zaprawy z dodatkiem metakaolinitu i żuźla wielkopiecowego. Przygotowano cztery serie próbek: kontrolna (PO), 10% metakaolinitu (M1), 10% metakaolinitu i 20% żuźla (S2), 10% metakaolinitu i 30% żuźla (S3). Wytrzymałość na ściskanie zapraw została przedstawiona na rysunku 8. Zaobserwowano, że metakaolinit zwiększa wytrzymałość na ściskanie zaprawy. Probki z metakaolinitem i żuźlem charakteryzowały się mniejszą 3 dniową wytrzymałością w porównaniu do zapraw kontrolnej i M1. Jednak już po 7 dniach wytrzymałość zapraw S2 i S3 była nieznacznie wyższa w porównaniu z wytrzymałością zaprawy kontrolnej, zaś po 28 dniach wszystkie modyfikowane zaprawy charakteryzowały się wyższą wytrzymałością. Dyfraktometria rentgenowska wykazała, że zastosowanie metakaolinitu w połączeniu z żuźlem powoduje zwiększoną konsumpcję wodorotlenku wapnia.



Rys. 8. Wytrzymałość na ściskanie zapraw (Li i Ding, 2003)

Badania wytrzymałości na zginanie próbek wykonanych z zaprawy zostały przedstawione przez Courard i in. (2003). Metakaolinit dozowany w ilości 5-20% masy cementu, jedna seria zawierała naturalny kaolin (10% masowo), nie poddany obróbce termicznej. Dodatek metakaolinitu obniżył wytrzymałość na zginanie po 3 dniach, natomiast po 28 dniach próbki z zawartością od 5 do 15% metakaolinitu miały o około 7% większą wytrzymałość. Zastosowanie naturalnego kaolinu nie poprawiło parametrów mechanicznych zapraw.

Wyniki badań betonów modyfikowanych zróżnicowanym udziałem metakaolinitu produkcji krajowej przedstawione w pracy (Konkol i Pyra, 2014) potwierdzają, że zastąpienie cementu 5% metakaolinitu powoduje wzrost wytrzymałości na ściskanie i wod szczelności betonu. Przy wprowadzeniu 10% i 15% metakaolinitu uzyskuje się znaczne korzyści. Dozowanie 15% metakaolinitu jako zamiennika cementu spowodowało, w porównaniu do betonu referencyjnego, wzrost wytrzymałości na ściskanie o ponad 23%, obniżenie nasiąkliwości o 42,5% oraz mniejszą głębokość penetracji wody pod ciśnieniem o prawie 78%.

W pracy (Konkol, 2012) stwierdzono na podstawie badań, że dodatki w postaci metakaolinitu i popiołu fluidalnego mogą być stosowane jako substytut cementu lub pyłu krzemionkowego.

Obecny trend, aby zmniejszać zawartość klinkieru w cemencie bądź zawartość cementu CEM I w betonie poprzez zastępowanie tych energochłonnych w produkcji materiałów dodatkami mineralnymi stanowi pewien problem w prefabrykacji, jako że wieloskładnikowe spoiwa nie są z reguły szczególnie reaktywne we wczesnym etapie. Wyniki badań wpływu metakaolinitu oraz innych dodatków mineralnych (żużel wielkopiecowy, krzemionka, pył krzemionkowy, kamień wapienny) na wczesną (1-dniową) i 28-dniową wytrzymałość zapraw poddanych naparzeniu przedstawiono w pracach Cassagnabère i in. (2009, 2010). Z punktu widzenia osiągniętych parametrów technicznych zapraw, jak również biorąc pod uwagę aspekt ekologiczny i ekonomiczny, najbardziej obiecującym dodatkiem okazał się metakaolinit. Stwierdzono, że zastąpienie cementu do 25% metakaolinitem w naparzonej zaprawie

spowodowało znaczący wzrost wytrzymałości 1-dniowej oraz podobne wytrzymałości 28-dniowe w porównaniu do zaprawy wykonanej z samym cementem. Na podstawie wyników badań XRD i analizy termicznej (Cassagnabère i in., 2009) zaczynów bez metakaolinitu i z 25% dozowaniem tego dodatku w stosunku do masy cementu, poprawę 1-dniowej wytrzymałości autorzy przypisują wystąpieniu reakcji pucolanowej dzięki aktywacji termicznej metakaolinitu pod wpływem naparzenia (55 °C przez 12,5h). O przebiegu tej reakcji świadczy zmniejszenie zawartości wodorotlenku wapnia oraz wzrost zawartości faz C-S-H i C-A-S-H w stwardniałym zaczynie.

Badania przeprowadzone w warunkach przemysłowych (Cassagnabère i in., 2010), w których zastosowano CEM I 52,5R oraz dostępny na lokalnym rynku metakaolinit dozowany do 25%, wykazały nieznaczny spadek wytrzymałości (poza dozowaniem 17,5%) w stosunku do betonu referencyjnego. Tym niemniej uzyskane rezultaty odpowiadają specyfikowanej 1-dniowej wytrzymałości dla betonów sprężanych.

5.4. Nasiąkliwość

Courard i in. (2003) zaprawy z metakaolinitem i naturalnym kaolinem przechowywali w warunkach laboratoryjnych (20°C, wilgotność względna 60%) Wyniki badania nasiąkliwości przedstawia tabela 7. Wraz ze wzrostem dozowania metakaolinitu nieznacznie rośnie nasiąkliwość zapraw. Spadek nasiąkliwości po 14 miesiącach autorzy przypisują karbonatacji zaczynu cementowego.

Tab. 7. Nasiąkliwość zapraw cementowych z CEM I 42,5, metakaolinitem i naturalnym kaolinem po 28 dniach i 14 miesiącach (Courard i in., 2003)

Rodzaj spoiwa	Nasiąkliwość masowa	
	Po 28 dniach	Po 14 miesiącach
CEM I 42,5	8,16	7,82
5% MK	8,39	8,04
10% MK	8,78	8,44
15% MK	9,71	8,77
20% MK	9,70	8,97
Kaolin 10%	9,51	7,90

Do podobnych wniosków doszli Khatib i Clay (2004), którzy badali absorpcję wody w betonach, w których cement zastępowano metakaolinitem do 20%.

6. Trwałość betonów modyfikowanych metakaolinitem

6.1. Dyfuzja jonów chlorkowych

Zastąpienie częściowe cementu metakaolinitem powoduje zmianę struktury porowatości kamienia cementowego (Kostuch i in., 1993; Khatib i Wild, 1996; Frías

i Cabrera, 2000; Duan i in., 2013; Aggelakopoulou i in., 2011), co prowadzi do znaczącej modyfikacji właściwości związanych z transportem wilgoci i dyfuzją szkodliwych jonów. Zmniejszeniu ulega objętość porów kapilarnych wielkości 0,05-10 μm (Sabir i in., 2001), które są odpowiedzialne za przepuszczalność. Poprawa porowatości (przesunięcie w kierunku porów o mniejszej średnicy) dzięki wprowadzeniu metakaolinitu powoduje zmniejszenie wnikania jonów chlorkowych w beton. Znaczące obniżenie wskaźnika dyfuzji jonów chlorkowych uzyskano przy 15% zastąpieniu cementu metakaolinitem.

Coleman i Page (1997) badali stężenie jonów chlorkowych w cieczy porowej zaczynów cementowych z metakaolinitem (0%, 10% i 20% masy cementu) na różnych etapach hydratacji. Dodatek metakaolinitu powodował zmniejszenie w późniejszych terminach stężenia jonów OH^- . Przyczyniał się też do znacznego obniżenia pH roztworu w konsekwencji reakcji pucolanowej. To z kolei skutkuje zmniejszeniem reaktywności alkaalia-kruszywa w betonach zawierających metakaolinit. Zaczyny z metakaolinitem wykazały również wyższą w porównaniu do zaczynów z samym cementem portlandzkim zdolność do wiązania jonów chlorkowych wprowadzonych do zaczynu poprzez zanieczyszczenie wody zarobowej chlorkiem sodu. W ten sposób jony chlorkowe zostały w większym stopniu wyeliminowane z cieczy porowej, co z kolei poprawiło właściwości ochronne stwardniałej matrycy cementowej z metakaolinitem. To w pewnym stopniu kompensuje obniżone pH roztworu i nie powoduje zmiany wskaźnika $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ w zaczynach bez i z metakaolinitem. Pozwala to stwierdzić, że ryzyko korozji stali spowodowane chlorkami przy zastąpieniu cementu portlandzkiego 20% metakolinitu nie powinno wzrosnąć.

W badaniach (Asbridge i in., 2001) oceniano wpływ metakaolinitu (10% masy cementu) i objętościowej zawartości kruszywa na kinetykę dyfuzji jonów chlorkowych w zaprawach cementowych. Dyfuzja

chlorkowa była monitorowana w warunkach stanu ustalonego i nieustalonego. Wyniki badań potwierdziły, że dodatek metakaolinitu spowodował obniżenie wskaźnika dyfuzji jonów chlorkowych w matrycy cementowej oraz korzystnie wpłynął na odporność na transport jonów chlorkowych w strefie kontaktowej zapraw cementowych.

Przenikalność jonów chlorkowych w betonie modyfikowanym metakaolinitem przy współczynniku w/s równym 0,3 i 0,5 zostały przedstawione przez Poon i in. (2006), a wyniki tych badań prezentuje tabela 8. W obu przypadkach wraz ze wzrostem zawartości metakaolinitu spada przenikalność jonów chlorkowych. Przy w/s = 0,3 zastąpienie cementu 10% metakaolinitu pozwala znacząco ograniczyć przenikalność, podczas gdy przy w/s = 0,5 dopiero dozowanie na poziomie 20% daje istotne ograniczenie.

Mardani-Aghabaglou i in. (2014) badali wpływ popiołu lotnego, pyłu krzemionkowego i metakaolinitu min. na penetrację jonów chlorkowych i odporność na agresję siarczanową zapraw cementowych. Ładunek przepływający przez zaprawy modyfikowane pyłem krzemionkowym, metakaolinitem i popiołem lotnym zmniejszył się odpowiednio o 75%, 65% i 45% w stosunku do zaprawy referencyjnej.

Güneyisi i Mermerdaş (2007) badali właściwości sorpcyjne i dyfuzję jonów chlorkowych w betonach dojrzewających w powietrzu i w wodzie. Cement zastępowano metakaolinitem w ilości 0-20%. Zaobserwowano, że wprowadzenie metakaolinitu znacząco poprawiło wytrzymałość i nieznacznie poprawiło głębokość wnikania jonów chlorkowych i właściwości sorpcyjne. Betony zawierające metakaolinit okazały się jednak bardziej wrażliwe na warunki pielęgnacji. Autorzy przypisują to zmianom kinetyki hydratacji wszystkich materiałów wiążących w betonie i postępowi hydratacji w momencie zaprzestania pielęgnacji.

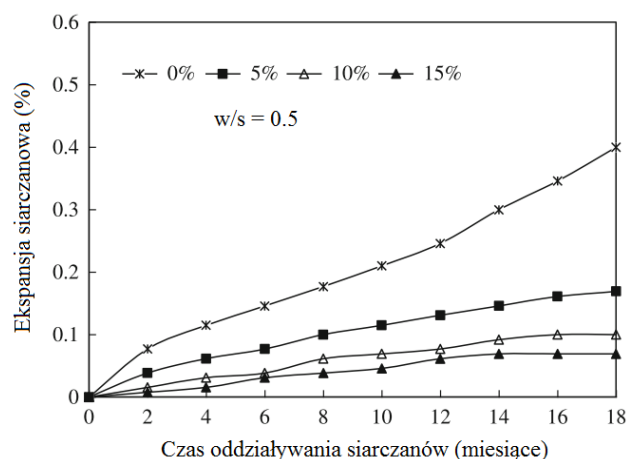
Tab. 8. Przenikalność jonów chlorkowych w betonach kontrolnych i modyfikowanych metakaolinitem (Poon i in., 2006)

Seria	Współczynnik w/s	Zawartość MK, %	Całkowity przepływający ładunek, Coulomb			
			3 dni	7 dni	28 dni	90 dni
1	0,30	0	2461	2151	1035	931
		5	1327	1244	862	646
		10	417	347	199	135
		20	406	395	240	124
2	0,50	0	5312	4054	2971	2789
		5	4215	3765	2079	1065
		10	1580	1247	918	752
		20	751	740	640	580

6.2. Odporność na agresję siarczanową

Podatność zapraw na korozję siarczanową badano (Mardani-Aghabaglou i in., 2014) na podstawie wydłużenia próbek z różnymi pucolanami, przechowywanych w roztworze Na_2SO_4 lub MgSO_4 . Próbkę kontrolną wykazały się największymi zmianami we wszystkich okresach badawczych. Próbkę zawierającą pył krzemionkowy i metakaolinit nie wykazywały oznak zniszczenia po 300 dniach badania, podczas gdy próbki kontrolne i zawierające popiół lotny były poważnie uszkodzone. Ekspansja w roztworze siarczanu sodu była niższa w porównaniu do ekspansji w siarczanie magnezu.

Al-Akhras (2006) badał ekspansję siarczanową przy różnym dozowaniu metakaolinitu. Badania te potwierdziły skuteczność tego dodatku w zabezpieczeniu betonu przed agresywnym działaniem siarczanów. Beton referencyjny okazał się nietrwały w środowisku siarczanowym, próbki osiągnęły maksymalne wydłużenie równe 0,4% i 0,45% po 18 miesiącach przy w/c odpowiednio równym 0,5 i 0,6. Beton, w którym cement zastąpiono metakaolinitem na poziomie 10% i 15% przy oby współczynnikach w/s wykazał się doskonałą odpornością na agresję siarczanową, a wydłużenie wyniosło odpowiednio 0,10% (10% MK) i 0,07% (15% MK) przy w/s = 0,5 oraz 0,13% (10% MK) i 0,10% (15% MK) przy w/s = 0,6. Wyniki dla próbek o w/s = 0,5 przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Wpływ metakaolinitu na agresję siarczanową (Al-Akhras, 2006)

Odporność korozyjną w roztworach Na_2SO_4 i MgSO_4 zapraw z cementów o różnej zawartości C_3A badał Pytel (2005). Metakaolinit dozowano w ilości 20% i 30% masy cementu. Badania potwierdziły, że dodatek metakaolinitu zwiększył odporność zapraw na działanie korozyjne siarczanów, w tym szczególnie MgSO_4 , jednak jego wpływ znacząco zaznacza się dopiero w przypadku dozowania 30%.

6.3. Odporność na korozję spowodowaną reakcją alkalia-kruszywo

Ramlochan i in. (2000) badali skuteczność wysokoreaktywnego metakaolinitu na korozję spowodowaną reakcją alkalia-kruszywo. Mierzyl

ekspansję próbek betonowych i z zapraw zawierających 0-20% tego dodatku jako częściowego zamiennika cementu. Z tych badań wynika, że zastąpienie cementu metakaolinitem w ilości 10-15% jest wystarczające do zahamowania ekspansji spowodowanej reakcją alkalia-kruszywo i po 2 latach badań spęcznienie beleczek betonowych wyniosło <0,04%. Zjawisko to autorzy przypisują wiązaniu alkaliów przez dodatkowe uwodnione fazy i obniżeniu pH cieczy porowej.

Kostuch i in. (1993) wykazali, że pęcznienie betonu powodowane reakcją alkalia-kruszywo może być całkowicie wyeliminowane poprzez zastąpienie cementu 15% metakaolinitu. Produkt reakcji w betonie pozbawionym metakaolinitu został określony jako "żel bogaty w Ca^{2+} ", zawierający niewielkie ilości jonów Na^+ i K^+ , a ilości poszczególnych jonów zależą od proporcji między CH a wolną krzemionką obecną w systemie.

6.6. Odporność na złuszczenia mrozowe

W badaniach (Máca i in., 2014) przygotowano następujące próbki betonowe przy stałym współczynniku w/s: beton referencyjny z CEM I 42,5 (REF), beton z CEM I 42,5 napowietrzony (AE), beton napowietrzony z dodatkiem 5% metakaolinitu zastępującego cement (MK5), beton z 9% metakaolinitu zastępującego cement (MK9). Wyniki przedstawia tabela 9. Wyniki uzyskane w pracy wskazują, że dodatek metakaolinitu wywarł korzystny wpływ na wytrzymałość i odporność na złuszczenia wywołane cyklami zamrażania i rozmrażania w roztworze NaCl.

Tab. 9. Właściwości betonu (Máca i in., 2014)

Właściwość	REF	AE	MK5	MK9
Gęstość pozorna, kg/m^3	2410	2250	2350	2270
Wytrzymałość na ściskanie, MPa	75,5	52,0	69,5	68,0
Masa złuszczeń po 144 cyklach, g/m^2	980	250,3	93,3	80

6.5. Karbonatyzacja

Pomimo, że dodatki pucolanowe, w tym metakaolinit, powodują zmniejszenie wymiaru porów, w wyniku reakcji puculanowej zmniejsza się zawartość portlandytu i w ten sposób obniża się potencjalne zabezpieczenie przed wnikaniem CO_2 . Wpływ metakaolinitu na karbonatyzację betonu przedstawiono w pracy Kim i in. (2007). Metakaolinit dozowano do 20% masy cementu. Próbkę przechowywano przez 56 dni w komorze klimatycznej, gdzie utrzymywano 5% stężenie CO_2 , 60% wilgotność względną i temperaturę 30°. Stopień karbonatyzacji próbek z metakaolinitem wzrósł o około 20-30% w porównaniu do próbki kontrolnej.

Bucher i in. (2015) badali głębokość karbonatyzacji w betonach wykonanych z CEM I, CEM II A-V oraz CEM II A-LL. Próbkę, w których 15% cementu zastąpiono metakaolinitem poddano karbonatyzacji

w warunkach naturalnych przez okres 2 lat oraz w komorze klimatycznej przy 4% CO₂, 50% wilgotności względnej i temperaturze 20°C. W przypadku zastosowania cementu popiołowego dodatek metakaolinitu spowodował wzrost głębokości karbonatyzacji o około 30% w porównaniu do próbki kontrolnej. Odmienna sytuacja miała miejsce w przypadku zastosowania cementu wapiennego. Głębokość karbonatyzacji była o około 10% mniejsza w odniesieniu do próbki bez dodatku. Mniejszą głębokość strefy zubożenia w tym przypadku należy tłumaczyć interakcją metakaolinitu z kamieniem wapiennym – powstałe uwodnione węglanogliniany wapnia spowolniają przenikanie CO₂ przez matrycę cementową.

Podsumowując wyniki badań trwałości kompozytów cementowych z metakaolinitem można stwierdzić, że materiał ten powoduje istotne zmiany składu chemicznego cieczy porowej w stwardniałej matrycy. Wraz ze wzrostem dozowania metakaolinitu następuje poprawa odporności na agresję siarczanową. Już 10% dodatku wystarcza do uzyskania trwałego materiału w warunkach tego rodzaju zagrożeń. Zastosowanie metakaolinitu w ilości 10-15% masy cementu jest wystarczające do tego, aby ograniczyć niszczące pęcznienie w wyniku reakcji alkalia-kruszywo w betonie. Wraz ze wzrostem zawartości metakaolinitu spada przenikalność jonów chlorkowych. Jego ilość konieczna do uzyskania znaczącego ograniczenia przenikalności zależy jest od współczynnika w/s. Podobnie jak w przypadku innych dodatków pucolanowych, problemem może być szybszy postęp karbonatyzacji otuliny w przypadku częściowego zastąpienia cementu metakaolinitem. Stanowi to zagrożenie w przypadku elementów zbrojonych. Należałoby w badaniach skoncentrować się nad ustaleniem maksymalnego dopuszczalnego dozowania metakaolinitu ze względu na pH betonu oraz szybkość i głębokość karbonatyzacji.

7. Inne zastosowania

Metakaolinit może być wykorzystywany do produkcji zapraw wapienno-metakaolinitowych. W przypadku remontów obiektów historycznych celowe jest stosowanie materiału wapiennego, bez użycia cementu, który nie był stosowany w budowlach starszych niż około 100 lat. W pracy Tesárek i in. (2005) zastosowano dwa rodzaje metakaolinitu różniące się składem chemicznym i uziarnieniem do modyfikacji zaprawy wapiennej. Stwierdzono, że oba dodatki poprawiły właściwości mechaniczne oraz właściwości cieplne i wilgotnościowe, ale lepsze efekty uzyskano po dodaniu metakaolinitu wypalanego w temperaturze 800-900 °C, niż w niższej temperaturze.

Badania nad możliwością zastosowania takiej zaprawy do restauracji obiektów zabytkowych przedstawiono w pracy Aggelakopoulou i in. (2011). Przygotowano zaprawy, w których spoiwem było wapno hydratyzowane oraz metakaolinit zmieszane w różnych proporcjach. ciągu 12 miesięcy twardnienia wykonywano analizę

termiczną DTA/TG, badano mikrostrukturę wykorzystując porozymetrię rtęciową, oceniano mechaniczne właściwości zapraw. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem dozowania metakaolinitu zwiększeniu ulegały następujące parametry: zawartość wody związanej, moduł sprężystości, wytrzymałość na ściskanie i zginanie. Struktura porowatości przesunęła się w kierunku porów o mniejszych średnicach. Wszystkie zaprawy charakteryzowały się podobnymi właściwościami mechanicznymi i mikrostrukturą, jak tradycyjne materiały, stąd okazały się przydatne do wykorzystania przy naprawach murów historycznych.

Potwierdzają to również wyniki badań przedstawione w pracy Andrejkovičová i in. (2013).

8. Porównanie metakaolinitu z innymi dodatkami

Jak wynika z danych dotyczących typowych składów tlenkowych dodatków mineralnych przedstawionych w tablicy 2, zawartości SiO₂ oraz Al₂O₃ wahają się w szerokim zakresie. Tym niemniej we wszystkich przypadkach podstawowym składnikiem jest krzemionka. Szklista krzemionka w naturalnych pucolanach powstaje w wyniku gwałtownego schłodzenia lawy i na ogół składa się z porowatych kulistych ziaren. Szklista amorficzna faza będąca składnikiem sztucznych pucolan oraz granulowanego żużla wielkopieczowego również powstaje w wyniku gwałtownego schłodzenia. W produkcji metakaolinitu krystaliczna struktura gliny (kaolinitu) jest niszczone w wyniku procesu kalcynacji. Reaktywność pucolan, a co za tym idzie dynamika przyrostu wytrzymałości, w dużej mierze zależy od ich powierzchni właściwej. Przykładowo, w przypadku zastąpienia części cementu popiołem lotnym, wytrzymałość betonu początkowo, a nierzadko również w późniejszych terminach, jest niższa niż dla betonu niemodyfikowanego dodatkiem. Powodem tego jest wolne tempo rozpuszczania się krzemionki, na co wpływ ma stosunkowo niewielka powierzchnia właściwa tej pucolany (300-400 m²/kg). Pył krzemionkowy i metakaolinit charakteryzują się dużym rozdrobnieniem i powierzchnią właściwą około 50 razy większą w porównaniu do popiołu lotnego. Zastępując częściowo cement tymi dodatkami uzyskujemy szybkie przyrosty wytrzymałości. Jednak w przypadku pyłu krzemionkowego i metakaolinitu problemem jest wzrost wodożądności spoiwa i pogorszenie urabialności mieszanek. Konieczne jest więc stosowanie efektywnych upłynniaczy oraz przeprowadzanie badań właściwości reologicznych w celu zaprojektowania optymalnego systemu cement-dodatek-superplastyfikator. Z kolei niektóre popioły lotne poprawiają urabialność mieszanek betonowych.

Takie dodatki jak popiół lotny, pył krzemionkowy i żużel wielkopieczowy są odpadami i w zasadzie nie wymagają dodatkowej obróbki (poza mieleniem żużla) przed użyciem w betonie. W przypadku pyłu krzemionkowego niestety nie przekłada się to na cenę produktu. Metakaolinit jest produktem przemysłowym,

którego wytworzenie jednak jest przyjaźniejsze dla środowiska niż produkcja cementu ze względu na niższą temperaturę procesu i niższą emisję CO₂ (Cassagnabère i in., 2009).

9. Wnioski

W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat przeprowadzono liczne badania mające na celu ocenę wpływu metakaolinitu, jako częściowego zamiennika cementu bądź kruszywa, na parametry techniczne zaczynów, zapraw i betonów cementowych. Przytoczone źródła świadczą o tym, że metakaolinit może być stosowany jako efektywny dodatek pucolanowy.

- Metakaolinit poprawia parametry mechaniczne zaczynów, zapraw i betonów cementowych zarówno w początkowym okresie twardnienia, jak i długo-okresowo, może być więc stosowany w prefabrykacji.
- Częściowe zastąpienie cementu metakaolinitem powoduje zasadnicze zmiany składu chemicznego stwardniałego zaczynu cementowego oraz cieczy porowej.
- Metakaolinit modyfikuje strukturę porowości zapraw i betonów cementowych i znacząco ogranicza przepuszczalność, a tym samym ogranicza dyfuzję szkodliwych jonów, w tym chlorkowych, które mogą prowadzić do uszkodzenia matrycy cementowej.
- Metakaolinit jest efektywnym dodatkiem poprawiającym zasadniczo odporność betonu na agresję siarczanową.
- Zastosowanie metakaolinitu w ilości 10-15% masy cementu jest wystarczające do tego, aby ograniczyć niszczące pęcznienie w wyniku reakcji alkalia-kruszywo w betonie.

Problemem w przypadku częściowego zastąpienia cementu metakaolinitem jest pogorszenie urabialności mieszanki oraz obniżenie pH cieczy porowej w betonie w wyniku redukcji zawartości CH, co może doprowadzić do pasywacji stali zbrojeniowej. Pierwszą niedogodność można przezwyciężyć stosując efektywne superplastyfikatory, uwzględniając kompatybilność systemu cement-metakaolinit-domieszka. Jeżeli chodzi o drugą kwestię, to badaniach nad metakaolinitem jako pucolanowym dodatkiem do betonu powinny być prowadzone w kierunku określenia jego maksymalnego dozowania, przy którym nie nastąpi zagrożenie korozją stali zbrojeniowej. Należałoby więc określić wpływ różnych poziomów zastąpienia cementu dodatkiem na pH betonu oraz postępek karbonatyzacji.

Literatura

- Aggelakopoulou E., Bakolas A., Moropoulou A. (2011). Properties of lime-metakaolin mortars for the restoration of historic masonries. *Applied Clay Science*, 53, 15-19.
- Al-Akhras N. M. (2006). Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, 36, 1727-1734.
- Ambroise J., Maximilien S., Pera J. (1994). Properties of metakaolin blended cements. *Advanced Cement Based Materials*, 1, 161-168.
- Andrejkovičová S., Velosa A., Gameiro A., Ferraz E., Rocha F. (2013). Palygorskite as an admixture to air lime-metakaolin mortars for restoration purposes. *Applied Clay Science*, 83-84, 368-374.
- Asbridge A.H., Chadbourn G.A., Page C.L. (2001). Effects of metakaolin and the interfacial transition zone on the diffusion of chloride ions through cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 31, 1567-1572.
- ASTM C618-15 (2015). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. Annual Book of ASTM Standards, *ASTM International*, West Conshohocken.
- Badogiannis E., Papadakis V.G., Chaniotakis E., Tsvivilis S. (2004). Exploitation of poor Greek kaoline: strength development of metakaolin concrete and evaluation by means of k-value. *Cement and Concrete Research*, 34, 1035-41.
- Badogiannis E., Kakali G., Tsvivilis S. (2005). Metakaolin as supplementary cementitious material. Optimization of kaolin to metakaolin conversion. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 81, 457-562.
- Badogiannis E., Tsvivilis S. (2009). Exploitation of poor Greek kaolins: durability of metakaolin concrete. *Cement and Concrete Composition*, 31, 128-33.
- Bai J., Wild S., Ware J.A., Sabir B.B. (2003). Using neural networks to predict workability of concrete incorporating metakaolin and fly ash. *Advances in Engineering Software*, 34, 663-669.
- Brooks J.J., Johari M.M.A. (2001). Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete. *Cement & Concrete Composites*, 23, 495-502.
- Bucher R., Cyr M., Escadeillas G. (2015). Carbonation of Blended Binders Containing Metakaolin. W: Proceedings of the 1st International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete, Red. K. Scrivener, A. Favier, Springer, 27-33.
- Cassagnabère F., Escadeillas G., Mouret M. (2009). Study of the reactivity of cement/metakaolin binders at early age for specific use in steam cured precast concrete. *Construction and Building Materials*, 23, 775-784.
- Cassagnabère F., Mouret M., Escadeillas G., Broilliard P., Bertrand A. (2010). Metakaolin, a F. solution for the precast industry to limit the clinker content in concrete: Mechanical aspects. *Construction and Building Materials*, 24, 1109-1118.
- Changling H., Osbaeck B., Makovicky E. (1995). Pozzolanic reaction of six principal clay minerals: activation reactivity assessments and technological effects. *Cement and Concrete Research*, 25 (8), 1691-1702.
- Coleman N.S., Page C.L. (1997). Aspects of the pore solution chemistry of hydrated cement pastes containing metakaolin. *Cement and Concrete Research*, 27(1), 147-154.
- Courard L., Darimont A., Schouterden M., Ferauche F., Willem X., Degeimbre R. (2003). Durability of mortars modified with metakaolin. *Cement and Concrete Research*, 33, 1473-1479.
- Curcio F., DeAngelis B.A., Pagliolico S. (1998). Metakaolin as a pozzolanic microfiller for high-performance mortars. *Cement and Concrete Research*, 28(6), 803-809.
- Duan P., Shui Z., Chen W., Shen C. (2013). Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 44, 1-6.

- Frias M., Cabrera J. (2000). Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin-cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 30, 561-569.
- Gartner E. (2004). Industrially interesting approaches to "low-CO₂" cement. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1489-98.
- Giergiczny Z. (2007). Właściwości popiołu lotnego a trwałość betonu. *Beton Technologie Architektura*, 7, 44-48.
- Gołaszewski J., Szwabowski J., Bisok B. (2005). Interaction between cement and superplasticizer in presence of metakaolin. *Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities. Admixture – Enhancing Concrete Performance. W: Proc. of 6th International Conference, Dundee*, 47-58.
- Güneyisi E., Mermerdaş K. (2007). Comparative study on strength, sorptivity, and chloride ingress characteristics of air-cured and water-cured concretes modified with metakaolin. *Materials and Structures*, 40(10), 1161-1171.
- Holtzer M., Rygulski T., Wyrobek A., Drożyński D. (2003). Wpływ dodatku pyłu krzemionkowego na właściwości klasycznych mas formierskich. *Archiwum Odlewnictwa*, 3(9), 197-202.
- Jonczy I., Lata L. (2013). Charakterystyka składu chemicznego żużli konwertorowych i wielkopieczowych. *Górnictwo i Geologia*, 8 (4), 51-61.
- Kadri E-H., Kenai S., Ezziane K., Siddique R., De Schutter G. (2011). Influence of metakaolin and silica fume on the heat of hydration and compressive strength development of mortar. *Applied Clay Science*, 53, 704-708.
- Khatib J.M., Wild S. (1996). Pore size distribution of metakaolin paste. *Cement and Concrete Research*, 26 (10), 1545-1553.
- Khatib J.M., Clay R.M. (2004). Absorption characteristics of metakaolin concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 19-29.
- Kim H. S., Lee S-H., Moon H-Y. (2007). Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin. *Construction and Building Materials*, 21, 1229-1237.
- Konkol. J. (2012). Metakaolinit i popiół fluidalny jako alternatywne w stosunku do pyłów krzemionkowych dodatki mineralne do betonu. *Inżynieria i Budownictwo*, 9, 503-507.
- Konkol J., Pyra M. (2014). Wybrane właściwości betonów modyfikowanych zmiennym udziałem dodatku metakaolinitu. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, JCEEA, t. XXXI, z. 61 (3/II/14), 287-296.
- Kostuch J.A., Walters G.V., Jones T.R. (1993). High Performance Concrete Incorporating Metakaolin – a review. *Concrete 2000. University of Dundee*, 1799-1811.
- Kurdowski W. (2010). Chemia cementu i betonu. *Stowarzyszenie Producentów Cementu, Wydawnictwo Naukowe PWN*.
- Li Z., Ding Z. (2003). Property improvement of Portland cement by incorporating with metakaolin and slag. *Cement and Concrete Research*, 33, 579-584.
- Máca P., Jandeková D., Konvalinka P. (2014). Wpływ dodatku metakaolinitu na odporność betonu na powstawanie odprysków pod działaniem mrozu. *Cement Wapno Beton*, 1, 1-7.
- Madandoust R., Mousavi S.Y. (2012). Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin. *Construction and Building Materials*, 35, 752-760.
- Mansour M.S., Abadlia M.T., Afalfi A., Ladaoui W. (2013). Reologia zapraw i betonów z dodatkami mineralnymi. *Cement Wapno Beton*, 5, 264-270.
- Mardani-Aghabaglou A., Sezer G.I., Ramyar K. (2014). Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point. *Construction and Building Materials*, 70, 17-25.
- Mermedas K., Gesoglu M., Guneyisi E., Ozturan T. (2012). Strength development of concretes incorporated with metakaolin and different types of calcined kaolins. *Construction and Building Materials*, 37, 66-774.
- Murat M. (1983). Hydration reaction and hardening of calcined clays and related materials. *Cement and Concrete Research*, 13, 259-266.
- Neville A.M. (2012). Właściwości betonu. *Wyd. Polski Cement, Kraków*.
- Poon C.S., Kou S.C., Lam L. (2006). Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Construction and Building Materials*, 20, 858-865.
- Pytel Z. (2005). Odporność chemiczna zapraw cementowych z dodatkiem metakaolinitu. *Cement Wapno Beton*, 6, 330-338.
- Ramezani-pour A.A., Jovein H.B. (2012). Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes. *Construction and Building Materials*, 30, 470-479.
- Ramlochan T., Thomas M., Gruber K.A. (2000). The effect of metakaolin on alkali-silica reaction in concrete. *Cement and Concrete Research*, 30, 339-344.
- Rashad A.M. (2013a). Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition - A comprehensive overview. *Construction and Building Materials*, 41, 303-318.
- Rashad A.M. (2013b). A preliminary study on the effect of fine aggregate replacement with metakaolin on strength and abrasion resistance of concrete. *Construction and Building Materials*, 44, 487-495.
- Saad M.N.A., de Andrade W.P., Paulon V.A. (1982). Properties of mass concrete containing an activate pozzolan made from clay. *Concrete International*, 4(7), 59-65.
- Sabir B.B., Wild S., Bai J. (2001). Metakaolin and calcined clays as pozzolans concrete: review. *Cement and Concrete Composites*, 23, 221-454.
- San Nicolas R. (2013). Characteristics and applications of flash metakaolins. *Applied Clay Science*, 83-84, 253-262.
- Sfikas I.P., Badogiannis E.G., Trezos K.G. (2014). Rheology and mechanical characteristics of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin. *Construction and Building Materials*, 64, 121-129.
- Siddique R., Klaus J. (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science*, 43, 392-400.
- Sonebi M., Lachemi M., Hossain K.M.A. (2013). Optimisation of rheological parameters and mechanical properties of superplasticised cement grouts containing metakaolin and viscosity modifying admixture. *Construction and Building Materials*, 38, 126-138.
- Subasi A., Emiroglu M. (2015). Effect of metakaolin substitution on physical, mechanical and hydration process of White Portland cement. *Construction and Building Materials*, 95, 257-268.
- Tafraoui A., Escadeillas G., Lebaill S., Vidal T. (2009). Metakaolin in the formulation of UHPC. *Construction and Building Materials*, 23(2), 669-674.
- Tesárek P., Tydlitát V., Drchalová J., Rovnaníková P., Černý R., (2005). Właściwości zaprawy wapiennej z dodatkiem metakaolinitu. *Cement Wapno Beton*, 4, 175-182.

- Wala D., Rosiek G. (2003). Minerality ilaste jako dodatek pucolanowy do cementów hydraulicznych. *Cement Wapno Beton*, 8/70 (1), 27-33.
- Wild S., Khatib, J.M. (1997). Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars. *Cement and Concrete Research*, 27(1), 137-146.
- Wild S., Khatib J.M., Jones A. (1996). Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. *Cement and Concrete Research*, 26(10), 1537-1544.
- Zhang M.H., Malhotra V.M. (1995). Characteristics of a thermally activated aluminosilicate pozzolanic material and its use in concrete. *Cement and Concrete Research*, 25 (8), 1713-1725.

METAKAOLIN AS A POZZOLANIC ADDITION FOR CONCRETE - REVIEW

Abstract: Mineral additions have become an integral part of concrete technology. They are a partial replacement of Portland cement, the manufacture of which requires high energy consumption and is environmental damaging. These may be naturally occurring materials, industrial wastes, by-products or materials requiring less energy to manufacture. The utilization of calcined clay, in the form of metakaolin, as pozzolanic addition for mortars and concretes has received considerable attention in recent years. It improves mechanical performance and exhibits considerable enhancement in durability properties. This paper presents an overview of the work carried out on the use of metakaolin as partial replacement of cement particularly useful in mortars and concretes subjected to hazardous environment. The literature demonstrates that metakaolin is an effective addition which causes improvement in the pore structure and hence the durability.

ZAGROŻENIA W INŻYNIERII PRODUKCJI BUDOWLANEJ

Jerzy OBOLEWICZ*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

Streszczenie: Zagrożenia w pracy mogą doprowadzić do szkody materialnej, uszkodzenia ciała, powstania choroby lub śmierci. W artykule zamieszczono wybrane zagadnienia z zakresu wypadkowości w budownictwie. Zdefiniowano i przedstawiono klasyfikację zagrożeń, scharakteryzowano inżynierię produkcji budowlanej oraz zagrożenia, które mogą się w niej pojawić. Zwrócono szczególną uwagę na profilaktykę inżynierską w procesie produkcji budowlanej.

Słowa kluczowe: zagrożenia, inżynieria, produkcja budowlana, profilaktyka.

1. Wprowadzenie

Według wyników badań prowadzonych przez Państwową Inspekcję Pracy (Sprawozdanie, 2015), branża budowlana jest jedną najbardziej niebezpiecznych gałęzi gospodarki w Polsce. Inspektorzy zbadali okoliczności i przyczyny zgłoszonych do inspekcji 2002 wypadków przy pracy zaistniałych w 2014 roku. Wskutek tych zdarzeń poszkodowanych zostało 2349 osób, w tym 768 doznało ciężkich obrażeń ciała, a 675 poniosło śmierć (tab. 1).

Poszkodowani w budownictwie stanowili ponad 25% ogółu poszkodowanych, w tym poszkodowani ze skutkiem śmiertelnym stanowili najliczniejszą (30%) grupę. Najczęściej wykonywaną pracą przez poszkodowanych tuż przed wypadkiem było chodzenie, bieganie, wchodzenie lub schodzenie a wydarzeniem powodującym uraz – uderzenie w nieruchomy obiekt pionowy

lub zderzenie z nim. Do wypadków ze skutkiem śmiertelnym dochodziło najczęściej:

- przy pracach na rusztowaniach (podczas montażu rusztowań, remontowania balkonów, dociepleń budynków i prac dekarских);
- na skutek upadku z drabiny (przystawnej, rozstawnej, tak zwanych „samoróbek”);
- w wykopach (w wyniku obsunięcia się gruntu, uderzenia przez maszynę, porażenia prądem).

Z ustaleń inspektorów Państwowej Inspekcji Pracy wynikało (Sprawozdanie, 2015) że wśród przyczyn wypadków przy pracy w 2014 roku dominowały przyczyny organizacyjne (45%), ludzkie (39,8%) oraz techniczne (15,2%). Szczegółową charakterystykę poszczególnych grup przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 1. Liczba poszkodowanych w wypadkach przy pracy zaistniałych w latach 2012-2014 zbadanych przez inspektorów pracy, opracowanie własne na podstawie (Sprawozdanie, 2015)

Lp.	Rok zaistnienia wypadku	Liczba zbadanych wypadków	Liczba poszkodowanych w wypadkach			
			Ogółem	w tym		
				ze skutkiem śmiertelnym	z ciężkimi obrażeniami ciała	
1	2014	Ogółem	2 002	2 349	267	768
		w tym zbiorowych	176	523	22	56
2	2013	Ogółem	1 999	2 454	339	781
		w tym zbiorowych	216	671	40	49
3	2012	Ogółem	1 985	2 312	371	773
		w tym zbiorowych	223	550	53	51

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: j.obolewicz@pb.edu.pl

Tab. 2. Przyczyny wypadków przy pracy w 2014 roku według Państwowej Inspekcji Pracy, opracowanie własne na podstawie (Sprawozdanie, 2015)

Lp.	Nazwa grupy	Charakterystyka grupy przyczyn
1	Przyczyny (T) techniczne	Brak, niewłaściwy dobór lub zły stan urządzeń ochronnych. Nieprawidłowości związane z eksploatacją urządzeń. Niewłaściwe środki ochrony zbiorowej lub ich brak. Niewystarczająca stateczność czynnika materialnego.
2	Przyczyny (O) organizacyjne	Brak instrukcji posługiwania się narzędziem, maszyną lub urządzeniem stosowanym przy pracy. Brak nadzoru nad pracownikami. Niewłaściwe przeszkolenie poszkodowanego w dziedzinie BHP i ergonomii lub brak przeszkolenia. Tolerowanie przez nadzór odstępstw od zasad bezpiecznej pracy. Niewłaściwa ogólna organizacja pracy. Nieprawidłowa organizacja stanowiska pracy.
3	Przyczyny (L) ludzkie	Nieprawidłowe zachowanie się pracownika, w tym zaskoczenie niespodziewanym zdarzeniem. Niedostateczna koncentracja uwagi na wykonywanej czynności. Lekceważenie zagrożenia. Nieznajomość zagrożeń oraz przepisów BHP. Wykonywanie czynności bez usunięcia zagrożenia (np. niewyłączenie maszyny lub niewyłączenie napięcia). Niewłaściwe operowanie kończynami w strefie zagrożenia. Nieużywanie sprzętu ochronnego przez pracownika.

Należy zwrócić uwagę, że najczęściej wypadkom ulegali poszkodowani o stażu pracy do roku, gdzie do podstawowych przyczyn wypadków zaliczono:

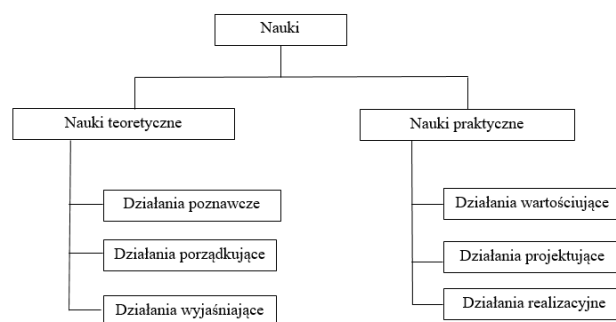
- brak instrukcji prowadzenia procesu technologicznego oraz instrukcji obsługi maszyn i urządzeń,
- brak nadzoru nad pracującymi,
- tolerowanie odstępstw od przepisów i zasad bezpieczeństwa i higieny pracy przez osoby sprawujące nadzór,
- lekceważenie i nieznajomość zagrożeń na stanowiskach pracy.

Analizując i oceniając sprawozdawczość unijną w poszczególnych sekcjach krajów UE27 (Hoła i Szóstak, 2015) również dostrzeżono wysoki poziom wypadkowości w budownictwie:

- budownictwo jest jedną z najbardziej wypadkogennych sekcji gospodarki unijnej (drugie miejsce, 418693 osoby poszkodowane w 2012 roku),
- pod względem liczby poszkodowanych w budownictwie Polska znajduje się na 11 miejscu wśród UE27,
- od względem wskaźnika ciężkości wypadków przy pracy Polska zajmuje 22 miejsce w krajach UE27.

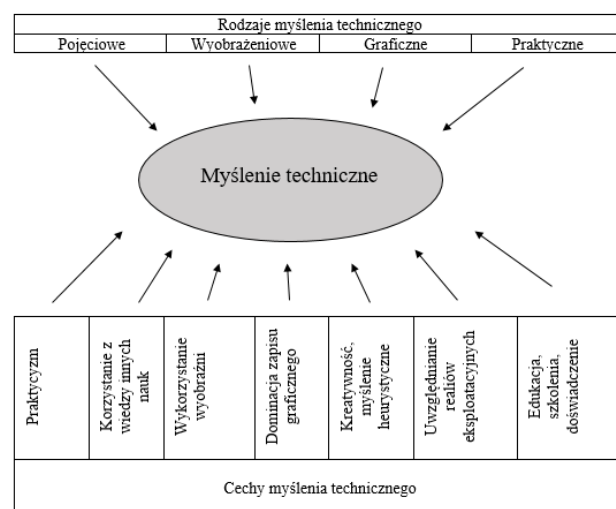
2. Inżynieria produkcji budowlanej

Historia inżynierii rozpoczęła się w starożytności wraz z dokonaniem pierwszych praktycznych i użytecznych odkryć. Już w pierwszej klasyfikacji nauk Arystoteles wyróżnił nauki praktyczne związane z działaniami wartościującymi, projektującymi i realizującymi (rys. 1) i pojawiło się „myślenie techniczne” (Tytyk, 2011b).



Rys. 1. Klasyfikacja nauk według Arystotelesa, opracowanie własne na podstawie (Tytyk, 2013)

Edward Franus podał cechy i rodzaje (rys. 2) oraz sformułował definicję „myślenia technicznego” traktując je jako proces odzwierciedlania oraz stosowania praw przyrody i zasad techniki w wytworach technicznych (objektach technicznych) i obiektach technologicznych (Franus, 1978).



Rys. 2. Schemat myślenia technicznego, opracowanie własne na podstawie (Franus, 1978)

Zdaniem Pszczołkowskiego (1978) inżynieria jest działem nauk praktycznych przekształcających wybrany fragment rzeczywistości, w tym materię nieorganiczną i organiczną, jak również rośliny, zwierzęta i ludzi.

Tytyk (2011a) zaproponował podejście systemowe do projektowania i wdrażania zagadnień inżynierii. W proponowanym przez niego systemie występowały operatorzy oraz obiekty techniczne współpracujące w optymalnych warunkach środowiskowych w miejscu pracy.

W literaturze inżynieria jest często traktowana jako nauka i umiejętność wykonywania prac inżynierskich, w tym projektowych i wdrożeniowych, których celem jest wytworzenie obiektów technicznych o wysokiej jakości oraz bezpiecznych, zdrowych i przyjaznych warunków współdziałania człowieka i obiektów technicznych (Tytyk, 2001) z zachowaniem tak zwanego „myślenia technicznego” (Tytyk, 2011b).

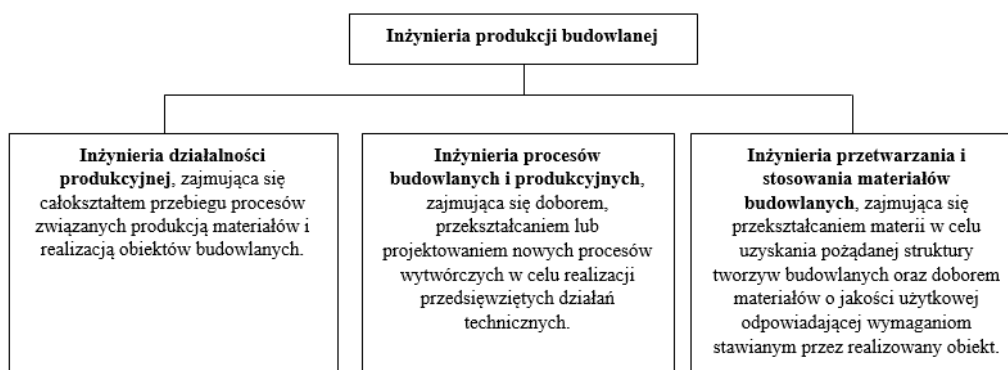
Etimologicznie słowa inżynieria i inżynier pochodzą od starofrancuskiego terminu *engineer*, które oznaczało konstruktora maszyn wojennych (Etimology, 2015).

Początku „inżynierii produkcji budowlanej” należy szukać łącząc historię inżynierii i dyscyplin dotyczących „zarządzania w budownictwie”, które w postaci sformalizowanej zaczęły się kształtować w Polsce po II wojnie światowej. Zniszczenia wojenne oraz zmiany w systemie politycznym wymagały nowego podejścia do zarządzania w budownictwie. Przeszkodą był brak doświadczenia w tym obszarze, ponieważ działalność przedsiębiorstw budowlanych przed wojną oparta była głównie na intuicji przedsiębiorców, a gospodarka narodowa po wojnie weszła w okres dynamicznego uprzemysłowienia i wymagała zastosowania nowych technologii, organizacji i myślenia ekonomicznego (Martinek, 2015). Proces kształtowania się „inżynierii procesów budowlanych” przebiegał w dwóch etapach. Pierwszy etap dotyczył zdefiniowania dyscyplin, w którym dominowały prace naukowe profesorów Dyżewskiego, Kluza, Kalabińskiego i Lenkiewicza obejmowały głównie problematykę budownictwa. W drugim etapie wykorzystywano już wiedzę interdyscyplinarną w projektowaniu, przygotowaniu i sterowaniu przebiegiem procesów produkcji materiałów budowlanych, realizacji obiektów budowlanych i ich utrzymaniem oraz w zarządzaniu przedsiębiorstwami

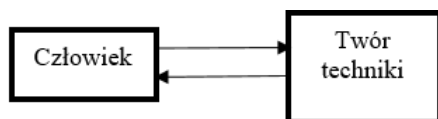
budowlanymi oraz procesami inwestycyjno-budowlanymi. W 1990 roku powstało Towarzystwo Naukowe Inżynierii Procesów Budowlanych, które koordynowało działalność naukową w tym obszarze, które następnie przekształciło się w Sekcję Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych przy Komitecie Inżynierii Lądowej i Wodnej Polskiej Akademii Nauk (Kasprowicz, 2015). Po wejściu Polski do UE poszerzono działalność naukowo-badawczą o problematykę jakości w budownictwie, zarządzania środowiskiem oraz zarządzania bezpieczeństwem pracy i ochroną zdrowia (bezpieczeństwem i higieną pracy).

Szukając wspólnego ujęcia dla działań w analizowanym obszarze sformułowano ogólną definicję „inżynierii procesów budowlanych” traktując ją jako całokształt (system złożony) wiedzy wykorzystywanej w budownictwie (rys. 3) w celu przekształcenia środowiska człowieka w stan zaproponowany przez inżynierię procesów projektowania budowlanego (Martinek, 2015).

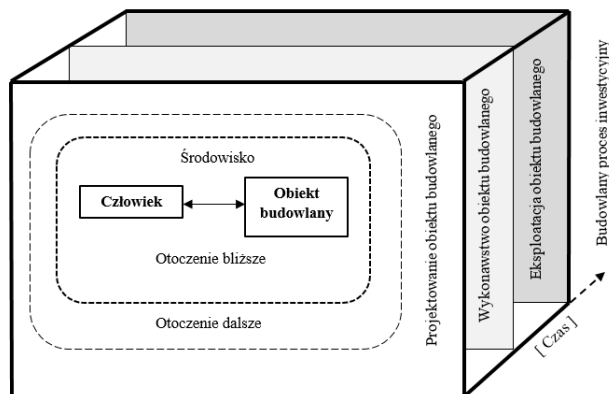
Według Tytyka (2011b) inżynieria produkcji jest nauką i umiejętnością wykonywania prac inżynierskich, których celem jest wytworzenie obiektów technicznych o właściwej jakości oraz bezpiecznych, zdrowych i przyjaznych człowiekowi właściwościach. Ważnym zadaniem inżynierii produkcji jest opracowywanie i stosowanie charakterystycznych metod tworzenia nowych rozwiązań – projektowania inżynierskiego, które stwarza największe szanse uzyskania projektu systemu: człowiek – obiekt techniczny – środowisko o pożądanym poziomie jakości, ergonomii i bezpieczeństwa na etapie projektowania, wykonawstwa i eksploatacji obiektu technicznego z zachowaniem tak zwanej homeostazy, która wiąże się z wymianą jaka zachodzi pomiędzy człowiekiem, a otoczeniem materii, energii lub informacji (Obolewicz, 2014; Baryłka i Baryłka, 2015). Posługując się pierwotnym schematem blokowym układu ergonomicznego (rys. 4) można zbudować współczesny model systemu inżynierii produkcji budowlanej (rys. 5), który obejmuje budowlany proces inwestycyjny, zdefiniowany jako skoordynowany ciąg czynności o charakterze technicznym, prawnym, technologicznym, organizacyjnym, finansowym, itp., prowadzący do realizacji i eksploatacji planowanej inwestycji budowlanej w określonym czasie przy ograniczonych zasobach finansowych (Połoński, 2009).



Rys. 3. Podsystemy związane z produkcją budowlaną, opracowanie własne na podstawie (Martinek, 2015)



Rys. 4. Pierwotny schemat blokowy podstawowego układu ergonomicznego (Wykowska, 1994)



Rys. 5. Współczesny model systemu inżynierii produkcji budowlanej, opracowanie własne na podstawie (Wykowska, 1994; Połośki, 2009; Obolewicz, 2014; Baryłka i Baryłka, 2015)

Wykorzystując klasyfikację nauk Arystotelesa, myślenie techniczne Franusa, osiągnięcia nauk zarządzania w budownictwie (podejście prof. Martinka), a także zasady obowiązującego prawa budowlanego i ochrony środowiska oraz bezpieczeństwa i ochrony zdrowia można definiować inżynierię produkcji budowlanej jako całokształt nauk i umiejętności wykonywania prac inżynierskich o charakterze technicznym, prawnym, technologicznym, organizacyjnym, finansowym, itp., obejmujących budowlaną działalność produkcyjną, procesy budowlane i produkcyjne, procesy przetwarzania i stosowania materiałów budowlanych, w tym projektowych, wdrożeniowych, wykonawczych i eksploatacyjnych, których celem jest zaprojektowanie, wdrożenie, wykonanie i eksploatacja obiektów budowlanych o wysokiej jakości oraz bezpiecznych, zdrowych i przyjaznych dla środowiska warunkach współdziałania człowieka z obiektami budowlanymi w określonym czasie, przy ograniczonych zasobach finansowych.

3. Zagrożenia w budowlanym procesie inwestycyjnym

Każda działalność człowieka jest potencjalnym zagrożeniem zdrowia i życia ludzkiego. Światowa Organizacja Zdrowia podała, że 52% światowej populacji przebywa w pracy 33% dorosłego życia. W wyniku oddziaływania czynników środowiska pracy powodujących zagrożenie powstało 120 milionów uszkodzeń ciała oraz 200 tysięcy zgonów (Ejdys i in., 2008).

Pojęcie terminu „zagrożenie” jest różnie

interpretowane w polskiej literaturze. W zależności od branży, w której występuje jest definiowane jako:

- niebezpieczeństwo (Filipkowski, 1975),
- zdarzenie zdeterminowane zachowaniem człowieka (Klonowicz, 1973),
- stan środowiska mogący spowodować wypadek lub chorobę lub źródło czy sytuacja, które mogą wyrządzić szkodę (uszkodzenie ciała lub chorobę, zniszczenie własności, szkodę dla środowiska) (Ejdys, i in., 2008).

W praktyce pod pojęciem „zagrożenie” najczęściej rozumie się sytuację, w której zachodzi prawdopodobieństwo utraty zdrowia lub życia albo szkód materialnych lub moralnych (Tomaszewski, 1974). Zagrożenia były klasyfikowane według różnych kryteriów:

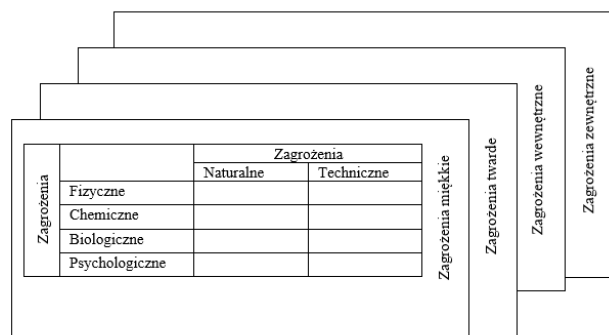
a) według obszaru występowania (Obolewicz, 2012):

- naturalne, które są związane z siłami natury,
 - techniczne, związane z obiektami antropogenicznymi,
- b) według źródła powstania (Mazurkiewicz, 1934):
- wewnętrzne, pochodzące od człowieka/pracownika wynikające z jego niedostatecznej wiedzy,
 - zewnętrzne, pochodzące z otoczenia pracy, związane z przebiegiem pracy, przedmiotami i narzędziami pracy (Indulski i Gdulewicz, 1990),

c) według rodzaju czynnika powodującego zagrożenie (Leowski, 1968):

- fizyczne,
 - chemiczne,
 - biologiczne,
 - psychologiczne,
- d) według skutku zagrożenia (Dawydzik, 1997):
- czynniki twarde (chemiczne, fizyczne, biologiczne, ergonomiczne),
 - czynniki miękkie zwane „psychofizycznymi stresorami” związane z ergonomiczno-fizjologicznymi warunkami pracy.

Ogólne zestawienie czynników zagrożenia przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Przykładowe zestawienie zagrożeń zawodowych

Pierwszą próbę usystematyzowania zagrożeń przedstawił Szubert (1966). Wyróżnił on cztery podstawowe grupy zagrożeń:

- zlokalizowane w konstrukcji, urządzeniach budynków i pomieszczeniach pracy,
- wynikające z używanych w procesach technik, narzędzi i urządzeń,

- będące wynikiem organizacji pracy,
- pochodzące od pracowników i niedostatecznej znajomości wymagań bezpieczeństwa i higieny pracy.

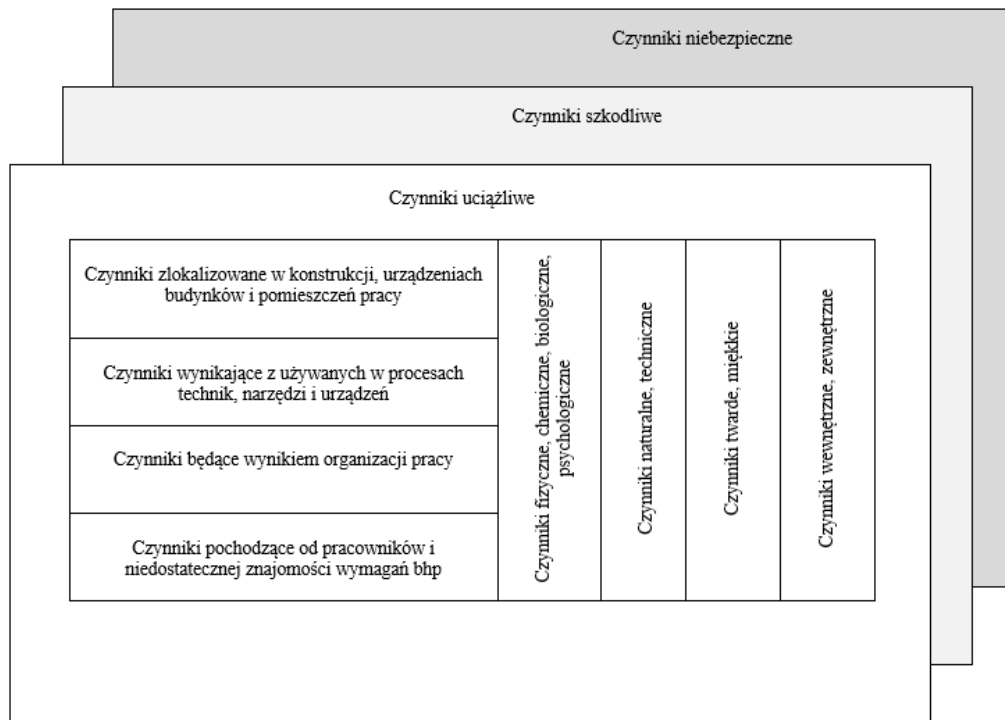
W środowisku pracy pracownik narażony może być na oddziaływanie różnorodnych czynników zagrażających zdrowiu i/lub życiu. Czynniki te określa się mianem czynników zagrożeń zawodowych. Z punktu widzenia oddziaływania na organizm człowieka można je podzielić na:

- czynniki uciążliwe, których oddziaływanie nie prowadzi do trwałego pogorszenia stanu zdrowia pracownika, może jednak powodować złe samopoczucie, nadmierne zmęczenie lub inne utrudnienia w pracy i obniżać zdolności do wykonywania pracy lub innej działalności bądź zmniejszenia wydajności;
- czynniki szkodliwe, ich oddziaływanie może prowadzić do wystąpienia schorzenia u pracownika;

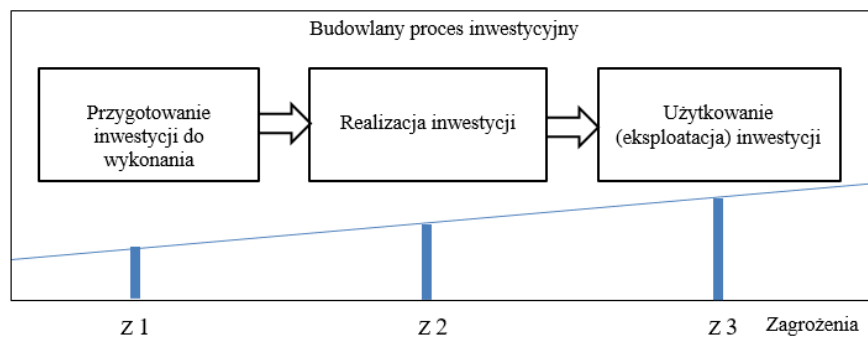
- czynniki niebezpieczne, ich oddziaływanie może spowodować natychmiastowe pogorszenie stanu zdrowia lub spowodować śmierć.

W zależności od poziomu oddziaływania lub innych warunków czynniki uciążliwe mogą stać się czynnikami szkodliwymi, a czynniki szkodliwe czynnikami niebezpiecznymi (rys. 7).

Największe zagrożenia dla pracowników w budowlanym procesie inwestycyjnym będą występowały w drugim i trzecim etapie budowlanego procesu inwestycyjnego (rys. 8). Występują one pod postacią zjawisk lub wywoływane są działaniem sił natury bądź człowieka i powodują, że poczucie bezpieczeństwa maleje bądź zupełnie zanika. Przykładowe rodzaje podstawowych zagrożeń wraz z ich charakterystyką przedstawiono w tablicy 3.



Rys. 7. Zestawienie ogólnych czynników zagrożeń zawodowych



Rys. 8. Zagrożenia w poszczególnych etapach budowlanego procesu inwestycyjnego (Obolawicz, 2012)

Tab. 3. Przykładowe rodzaje podstawowych zagrożeń i ich charakterystyka (Obolewicz, 2012)

Lp.	Rodzaj zagrożenia	Charakterystyka
1.	Zagrożenia zwyczajne	Zagrożenie powszechnie występujące, charakteryzuje się względną regularnością wytypowania niekorzystnych zdarzeń i zjawisk, jak na przykład wytwarzanie hałasu środkami lokomocji o natężeniu przekraczającym normy albo wprowadzenia zanieczyszczeń do wód, powietrza, gleby.
2.	Zagrożenia nadzwyczajne spowodowane przyczynami naturalnymi	Zagrożenia wywołane przyczynami naturalnymi lub cywilizacyjnymi, mogące spowodować znaczne zniszczenie środowiska, lub istotne pogorszenie jego stanu albo zagrożenie życia lub zdrowia ludzi w wyniku zanieczyszczenia, skażenia elementów środowiska. Mogą być spowodowane przyczynami naturalnymi (powódzie, susze, wyładowania atmosferyczne, wstrząsy sejsmiczne, sztormy, huragany, gwałtowne opady, masowe występowania chorób, lawiny, burze gradowe)
3.	Zagrożenia nadzwyczajne spowodowane przyczynami cywilizacyjnymi	Katastrofy i awarie – jako gwałtowne niezamierzone zdarzenia, powodujące w szczególności zniszczenia obiektów lub urządzenia technicznego powodujące przerwę w jego działaniu. Materiały niebezpieczne, na przykład obchodzenie się z materiałami niebezpiecznymi może spowodować śmierć, utratę zdrowia, zniszczenie środowiska. Na podstawie katalogu możliwych katastrof i awarii na obszarze kraju wymienia się następujące nadzwyczajne zagrożenia: a) skażenie promieniotwórcze, b) wybuchy, rozległe pożary, c) katastrofy budowlane i komunikacyjne, d) zakażenia biologiczne ludzi, zwierząt i roślin, e) powódzie naturalne lub katastrofalne zatopienia powodowane awariami urządzeń hydrotechnicznych, f) huragany, zawieje, burze gradowe, śnieżyce, susze powodujące stan klęski żywiołowej.
4.	Zagrożenia spowodowane skażeniem promieniotwórczym	Skażenia promieniotwórcze mogą spowodować głównie energetyka jądrowa i przemysł. Źródłem promieniowania mogą być materiały budowlane niespełniające stawianych im wymagań. Wyróżnia się 2 rodzaje zagrożeń: miejscowe i publiczne Miejscowe (lokalne) mają ograniczony zasięg, mogą występować w laboratoriach izotopowych, w zakładach medycznych, czy na składowiskach odpadów promieniotwórczych.
5.	Zagrożenia spowodowane skażeniem chemicznym	Przyczyną zagrożeń spowodowanych skażeniem chemicznym może być dynamicznie rozwijający się przemysł energetyczny, chemiczny, spożywczy, włókienniczy czy budowlany, który generuje nadmierne ilości chloru, tlenku węgla, tlenku azotu, dwutlenku siarki, kwasu azotowego czy fluorowodoru oraz dwusiarczku węgla, ołowiu albo amoniaku.
6.	Zagrożenia spowodowane pożarami	Do najczęstszych przyczyn pożarów należą: nieostrożność ludzi, podpalenia celowe, wypalanie łąk i ściernisk, wyładowania atmosferyczne i zerwanie linii energetycznych, zapróższanie ognia oraz nieznanne przyczyny pożarów.

W budownictwie nie ma możliwości całkowitego uniknięcia niebezpieczeństwa związanego z pracą. Należy eliminować i ograniczać zagrożenia prowadzące do zaistnienia niebezpiecznych i ryzykownych sytuacji. Wśród zidentyfikowanych przez inspektorów pracy przyczyn wypadków w 2014 roku dominującą grupę stanowiły przyczyny organizacyjne i ludzkie. Co drugi wypadek wydarzył się na budowie, a wśród przyczyn dominowały: brak nadzoru, brak urządzeń zabezpieczających, brak instrukcji oraz nieznanostwo zagrożeń. Najczęściej wypadkom ulegali młodzi robotnicy przemysłowi oraz osoby wykonujące prace proste z krótkim stażem pracy (Sprawozdanie, 2015).

Przy realizacji większości inwestycji budowlanych pracuje zazwyczaj więcej niż jeden podwykonawca, a wśród przedsiębiorstw zaangażowanych na placach budów – małe firmy budowlane (Dąbrowski, 2013a). Na bezpieczeństwo pracy w budownictwie mają wpływ pracodawcy i pracownicy (Kodeks pracy, 2016) oraz uczestnicy budowlanego procesu inwestycyjnego

zaangażowane w ten proces.

Propozycje działań ukierunkowanych na eliminację zagrożeń, a tym samym na poprawę stanu bezpieczeństwa w budownictwie powinny odnosić się do wszystkich uczestników procesu i instytucji mających wpływ na bezpieczeństwo w tej sekcji gospodarki, a w szczególności do etapu realizacji i eksploatacji obiektu budowlanego (Dąbrowski, 2000 i 2013b). W działaniach profilaktycznych należy odnieść się do następujących zagadnień obejmujących obszary:

- a) organizacji pracy i współpracy uczestników procesu budowlanego i instytucji mających wpływ na bezpieczeństwo, w tym:
 - rozpoczynanie działalności na placu budowy,
 - współpraca uczestników budowy (generalnego wykonawcy, kierownictwa budowy, służb BHP),
 - zatrudnianie pracowników firm zewnętrznych na podwykonawców,
 - koordynacja bezpieczeństwa i ochrony zdrowia na budowie;

- b) opracowania i prowadzenia dokumentacji bezpieczeństwa i ochrony zdrowia (BIOZ), w tym:
- umowa inwestycyjna,
 - instrukcja bezpieczeństwa wykonywania robót budowlanych,
 - ocena ryzyka zawodowego,
- c) środków ochrony przed urazami, w tym: zabezpieczenia dostępu do stanowisk pracy, zabezpieczenia stanowisk pracy na wysokości, bezpieczeństwo robót ziemnych, zabezpieczenie placu budowy,
- d) szkoleń pracowników, w tym:
- programy i jakość szkoleń,
 - kwalifikacje i uprawnienia pracowników,
 - szkolenia informacyjne, wstępne i okresowe pracowników,
- e) użytkowania maszyn i urządzeń, w tym:
- nowe maszyny,
 - przeglądy i kontrole użytkowanych maszyn i urządzeń.
- Działania profilaktyczne będą przynosiły pozytywne efekty przy zaangażowaniu wszystkich zainteresowanych stron włącznie z inwestorami, inspektorami nadzoru inwestorskiego, inwestorami zastępczymi, projektantami, koordynatorami, podwykonawcami, dostawcami, firmami ubezpieczeniowymi, instytucjami publicznymi oraz inspektorami pracy.

4. Podsumowanie

Budownictwo należy do najbardziej niebezpiecznych gałęzi gospodarki. Na taki stan rzeczy duży wpływ mają czynniki społeczno-gospodarcze i środowiskowe. Identyfikacja czynników zagrożeń zawodowych w budownictwie jest niezbędna w procesie tworzenia bezpiecznych warunków pracy. Zagrożenia te można podzielić na niebezpieczne, szkodliwe i uciążliwe. Czynniki niebezpieczne powodujące zagrożenia mogą być przyczyną wypadków przy pracy, natomiast czynniki szkodliwe i uciążliwe mogą powodować schorzenia i choroby zawodowe. Działania profilaktyczne, w celu zapewnienia bezpieczeństwa pracy na placach budowy, powinny obejmować: odpowiednie przygotowanie i zorganizowanie terenu budowy, właściwe przygotowanie i przeszkolenie pracowników, wyposażenie budowy w bezpieczne maszyny, urządzenia i narzędzia oraz przygotowanie budowlanych stanowisk pracy z godnie z wymaganiami bezpieczeństwa i higieny pracy.

Literatura

- Baryłka A., Baryłka J. (2015). Funkcje techniczne w budownictwie. Przewodnik po inwestycyjnym i eksploatacyjnym procesie budowlanym. *Oficyna Wydawnicza POLCEN*, Warszawa.
- Dawydzik L. T. (1997). Zaawansowanie procesu przekształceń w systemie ochrony zdrowia pracujących. *Medycyna pracy*, 1/1997, 19.
- Dąbrowski A. (2000). Bezpieczeństwo i higiena pracy w przedsiębiorstwach budowlanych. *Poradnik pracodawcy. Wyd. CIOP-PIB*, Warszawa.
- Dąbrowski A. (2013a). Bezpieczna praca w małych firmach budowlanych. *Wyd. CIOP-PIB*, Warszawa.
- Dąbrowski A. (2013b). Działania na rzecz ochrony przed zagrożeniami na placu budowy. *Wyd. CIOP-PIB*, Warszawa.
- Ejdys J., Lulewicz A., Obolewicz J. (2008). Zarządzanie bezpieczeństwem w przedsiębiorstwie. *Wyd. Politechniki Białostockiej*, Białystok.
- Etymology the English Word Engineer. <http://www.myetymology.com>. Dostęp 01.12.2015.
- Filipkowski S. (1975). Powstanie wypadków przy pracy i zasady profilaktyki. *Zarys teorii. Instytut Wydawniczy CRZZ*, Warszawa.
- Franus E. (1978). Myślenie techniczne. *Wyd. Ossolineum*, Wrocław.
- Hoła B., Szóstak M. (2015). Analiza i ocena wypadkowości w poszczególnych sekcjach gospodarki UE. W: Konferencja Naukowo-Techniczna. Inżynieria Przedsięwzięć Budowlanych. *Wyd. Wydziału Inżynierii Lądowej Instytutu Inżynierii Budowlanej Politechniki Warszawskiej*, Warszawa, 65-67.
- Indulski J., Gdulewicz T. (1990). Główne zagrożenia zawodowe w Polsce. W: Człowiek - środowisko - zdrowie, Red. J. Kopczyński i A. Sieńskii, *Zakład Narodowy im. Ossolińskich*, Wrocław, 333-343.
- Inżynieria przedsięwzięć budowlanych. Rekomendowane metody i techniki (2015). Red. T. Kasprówicz, *Wyd. Sekcji Inżynierii Przedsięwzięć Budowlanych Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN*, Warszawa.
- Klonowicz S. (1973). Słownik Terminologiczny Fizjologii i Higieny Pracy. *Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich*, Warszawa.
- Kodeks pracy (2016). W: *Poradnik prawny „Rzeczypospolitej”*.
- Leowski J. (1968). *Zarys fizjologii i higieny pracy. Wyd. Związkowe*, Warszawa.
- Martinek W. (2015). Historia tematyki Inżynierii Produkcji Budowlanej na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej w ramach 100-lecia odnowienia tradycji uczelni. W: Konferencja Naukowo-Techniczna. Inżynieria Przedsięwzięć Budowlanych. *Wyd. Wydziału Inżynierii Lądowej Instytutu Inżynierii Budowlanej Politechniki Warszawskiej*, Warszawa.
- Mazurkiewicz A. (1934). Zagadnienia organizacji bezpieczeństwa pracy w fabryce. W: W służbie bezpieczeństwa pracy. *Wyd. Instytut Spraw Społecznych*, Warszawa, 116-117.
- Obolewicz J. (2012). Bezpieczeństwo pracy w budownictwie. *Wyd. Unimedia Sp. z o.o.*, Warszawa.
- Obolewicz J. (2014). Raport Projektu badawczego nr115347038 Narodowego Centrum Nauki w latach 2010-2013. *Politechnika Białostocka*, Białystok.
- Połośki M. (2009). Kierowanie budowlanym procesem inwestycyjnym. *Wyd. SGGW*, Warszawa.
- Pszczółkowski T. (1978). Mała encyklopedia prakseologii i teorii organizacji. *Ossolineum*, Wrocław.
- Sprawozdanie z działalności Państwowej Inspekcji Pracy w 2014 roku (2015). *Badanie okoliczności i przyczyn wypadków przy pracy. Państwowa Inspekcja Pracy*, Warszawa.
- Szubert W. (1966). Ochrona pracy. Studium społeczno-prawne. *Państwowe Wydawnictwo Naukowe*, Warszawa.
- Tomaszewski T. (1974). Człowiek w systemie pracy. W: Ergonomia. Zagadnienia przystosowania pracy do człowieka. *KIW*, Warszawa.

- Tytyk E. (2001). Projektowanie ergonomiczne. PWN. Warszawa-Poznań, 52-53.
- Tytyk E. (2011a). Metodologiczne podstawy inżynierii ergonomicznej, W: Inżynieria ergonomiczna. Teoria (red. E. Tytyk). *Wyd. Politechniki Poznańskiej*, Poznań, 7-24.
- Tytyk E. (2011b). Myślenie techniczne w ergonomii, W: Charytynowicz J. (red.) Zastosowania ergonomii. Wybrane kierunki badań ergonomicznych w 2010 roku. *Wyd. PTErg Oddz. Wrocław*.
- Tytyk E. (2013). Dylematy nauk ergologicznych i inżynierskich. *Forestry Letters*, Vol. 104, 11-21.
- Wykowska M. (1994). Podstawy ergonomii. *Wyd. AGH*, Kraków.

THREATS IN ENGINEERING OF CONSTRUCTION PRODUCTION

Abstract: The threats in work can lead to material damage, damage of body, rise of disease or death. In article chosen questions in the field of accident rate in construction. The classification of threats were was defined and presented. The engineering of construction production as well as the threats which can occur here were characterised. The special attention was paid on engineering prevention in process of construction.