

prof. dr hab. inż. Elżbieta Horszczaruk
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Ścieranie betonów w konstrukcjach hydrotechnicznych - modele predykcji uszkodzeń i metody badań

Concrete abrasion in hydraulic structures - damage prediction models and test methods

Streszczenie

Uszkodzenia betonu spowodowane ścieraniem będącym wynikiem erozyjnego oddziaływania osadów transportowanych przez wodę stanowią poważny problem związany z trwałością konstrukcji hydrotechnicznych. Ze względu na złożoność oddziaływań na te konstrukcje wiele aspektów jest nadal przedmiotem debaty, pomimo ogromnych wysiłków, które zostały podjęte w tym temacie od wielu lat. Należy podkreślić, że w normach europejskich nadal nie ma normy dedykowanej do badań ścieralności betonu w konstrukcjach hydrotechnicznych, a wytyczne w zakresie projektowania konstrukcji betonowych w klasie XM dopiero w 2023 r. znalazły się w głównej normie EN 1992-1-1. Niniejsza praca ma na celu przedstawienie modeli stosowanych do predykcji uszkodzeń wywołanych ścieraniem na skutek hydroabrazji. Dokonano również przeglądu i oceny metod badań ścieralności betonu pod kątem ich wykorzystania w projektowaniu.

Abstract

Damage to concrete due to abrasion resulting from the erosive action of sediments transported by water is a serious problem related to the durability of hydraulic structures. Due to the complexity of the impacts on these structures, many aspects are still under debate, despite the great efforts that have been made on this topic for many years. It should be noted that there is still no standard in European standards dedicated to the abrasion testing of concrete in hydro-engineered structures, and guidelines for the design of concrete structures in the XM class have only been included in the main standard EN 1992-1-1 in 2023. This thesis aims to present the models used to predict abrasion damage due to hydroabrasion. It also reviews and evaluates concrete abrasion test methods for their use in design.

1. Wprowadzenie

Duża liczba betonowych konstrukcji hydrotechnicznych takich jak rurociągi, tunele transportujące wodę czy zapory jest narażona na poważne uszkodzenia spowodowane ścieraniem. Uszkodzenia betonu konstrukcji hydrotechnicznych spowodowane ścieraniem to proces fizyczny polegający na ciągłej utracie materiału na powierzchni wywołany głównie obciążeniami hydrodynamicznymi. Nadmierna wielkość uszkodzeń wywołana ścieraniem zagraża prawidłowej eksploatacji obiektów hydrotechnicznych i prowadzi do wysokich kosztów napraw [1]. Uszkodzenia spowodowane ścieraniem nagromadzone w długim okresie lub spowodowane znacznymi klęskami powodziowymi stanowią krytyczny problem dla betonowych konstrukcji hydrotechnicznych. Dlatego na początkowym etapie projektowania należy przeprowadzić kompleksową analizę w celu poprawy odporności takich konstrukcji na ścieranie, w szczególności w przypadku infrastruktury wymagających długiego okresu użytkowania. Zoptymalizowany system projektowania konstrukcji hydrotechnicznych wraz z doбором materiałów, może znacznie zmniejszyć uszkodzenia betonu spowodowane ścieraniem, a co za tym idzie, późniejsze koszty konserwacji i renowacji.

Zjawisko ścierania w odniesieniu do betonowych konstrukcji hydrotechnicznych jest zjawiskiem złożonym fizycznie. Najczęstszym oddziaływaniem jest tzw. hydroabrazja, czyli zużycie ściernie konstrukcji betonowej w wyniku oddziaływania rumowiska (morskiego lub rzeczno transportowanego przez wodę [2]). Hydroabrazja jest przedmiotem badań naukowców od dziesięcioleci, a większość badań opiera się o testy laboratoryjne [3-7]. Jednak w wielu przypadkach uzyskane wyniki eksperymentalne różnią się znacznie między sobą ze względu na brak znormalizowanych warunków i procedur badań. Ponadto stwierdzono, że w większości uzyskanych wyników badań brakuje oceny uszkodzeń spowodowanych ścieraniem betonu, zazwyczaj w wyniku ograniczonych danych dotyczących rzeczywistych warunków pracy konstrukcji [8]. Rozwiązania materiałowe w kierunku poprawy odporności betonu na hydro- abrazję, tak aby można było zapewnić ich trwałość nawet wtedy, gdy konstrukcje hydrotechniczne są narażone na trudne warunki, np. dużą prędkość przepływu wody czy wysoki strumień osadów koncentrują się głównie na wzmocnieniu matrycy cementowej. W tym zakresie zaproponowano różne metody, w tym m.in. zastosowanie włókien nieciągłych, uzupełniających, dodatków mineralnych, cząstek gumy ciągliwej oraz materiałów powłokowych [2, 9, 10].

Na odporność betonu na ścieranie ma wpływ szereg czynników, w szczególności warunki hydrauliczne i właściwości betonu. Ważnymi parametrami są m.in. prędkość przepływu, kąt uderzenia przepływu, zawartość osadów, właściwości cząstek ściernych, czas ekspozycji, wytrzymałość betonu i struktura porów betonu. Istnieją jednak duże różnice w wynikach badań dotyczących wpływu poszczególnych parametrów, co wskazuje na złożoność zjawiska ścieralności.

Podstawowe mechanizmy stojące za uszkodzeniami betonu spowodowanymi ogólnie rozumianym ścieraniem w tym hydroabrazją nie w sposób kompleksowy opisane, a długotrwałe, pewne zabezpieczenie trwałości betonowych konstrukcji hydrotechnicznych przed uszkodzeniami na skutek ścierania. W pracy przedstawiono podstawowy teoretyczne będące podstawą modeli prognostycznych opisujących mechanizmy zużycia są jeszcze dalekie od rozwiązania. W związku z tym wysoce pożądany jest przegląd stanu wiedzy na temat ścieralności betonu w konstrukcjach hydraulicznych. Aby wypełnić tę lukę, niniejszy przegląd koncentruje się na modelach

przewidywania ścierania i przeglądzie metod badań do pomiaru i oceny uszkodzeń spowodowanych ścieraniem. Praca ta ma na celu rzucenie światła na ważne aspekty uszkodzeń betonu konstrukcji hydrotechnicznych spowodowanych ścieraniem.

2. Modele predykcyjne ścierania

Obliczenia trwałości konstrukcji hydrotechnicznych oparte są na ogół na modelach przewidywania ścieralności betonu. Modele do badania i przewidywania uszkodzeń betonu spowodowanych ścieraniem możemy podzielić na cztery główne grupy: modele empiryczne, modele półempiryczne, modele statystyczne oparte na prawdopodobieństwie oraz modele oparte na metodologiach uczenia maszynowego.

2.1. Modele empiryczne

Najczęściej stosowane modele wykazują proporcjonalną zależność między głębokością ścierania betonu D a jego wytrzymałością na ściskanie f_c [11-14]. Do przewidywania głębokości ścierania zastosowano funkcje liniowe, wielomianowe, logarytmiczne i potęgowe (patrz Tabela 1).

Tabela 1. Przykłady modeli empirycznych ścierania betonu

Model empiryczny	Format	Relacja
Liniowy	$W_{ar}=af_c+b$	Zależność między szybkością ścierania W_{ar} i wytrzymałością betonu na ściskanie f_c [15]
	$D=at$	Zależność między głębokością zużycia D i czasem ścierania t [16]
Wielomianowy	$D=a_1+a_2f_c+a_3f_c^2$	Zależność między głębokością zużycia D i wytrzymałością betonu na ściskanie f_c [17]
	$M_1=a_1+a_2f_{ft}+a_3f_{ft}^2$	Związek między ubytkiem masy M_1 i wytrzymałością betonu na zginanie f_f lub rozciąganie f_t [18]
Wykładniczy	$M_1=e^{afc}$	Związek między ubytkiem masy M_1 i wytrzymałością betonu na ściskanie f_c [16]
Logarytmiczny	$D=a+b\ln f_c$	Zależność między głębokością zużycia D i wytrzymałością betonu na ściskanie f_c [14]
Potęgowy	$D=af_c^b$	Zależność między głębokością zużycia D i wytrzymałością betonu na ściskanie f_c [17]
	$W_{ar}=av^b$	Zależność między szybkością ścierania W_{ar} i prędkością przepływu v [19, 20]

2.2. Modele półempiryczne

Dokładność modeli predykcyjnych można poprawić za pomocą bardziej zaawansowanych metod, np. modeli półempirycznych, opracowanych w oparciu o połączenie pomiarów eksperymentalnych i teorii matematycznych. Bitter [21] zaproponował zależność wyrażającą ścieranie jako funkcję energii kinetycznej:

$$W_D = \frac{1}{2} \frac{M(V \sin \alpha - K)^2}{\varepsilon} \quad (1)$$

W modelu tym uwzględnił tylko zużycie wywołane tylko odkształceniami uderowymi, co nie uwzględnia faktu, że w podczas procesu ścierania mogą istnieć jednocześnie dwie formy mechanicznych odkształceń: zużycie udarnośćciowe i zużycie tnące. Zaproponowano zmodyfikowany model, który uwzględnia oba te oddziaływania: obciążenie udarnośćciowe i obciążenie tnące wywołane cząstkami ścierającymi powierzchnie materiału [22, 23]:

$$W = W_D + W_C = \frac{\frac{1}{2} M(V \sin \alpha - K)^2}{\varepsilon} + \frac{\frac{1}{2} M V^2 \cos^2 \alpha \sin 2\alpha}{\varphi} \quad (2)$$

gdzie:

W - całkowita utrata objętości spowodowaną zużyciem ściernym przy kącie uderzenia α i prędkość przepływu V,

W_D i W_C - zużycie ściernie spowodowane normalnym odkształceniem uderowym i stycznym działaniem skrawania,

ε i φ - czynniki wpływające na energię kinetyczną związaną z odkształceniem uderowym i zużyciem skrawania

M - całkowita masa uderzających cząstek,

K - składowa prędkości krytycznej prostopadła do powierzchni betonu, poniżej której nie występuje ścieranie.

Niektórzy badacze wykazali, marginalny wpływ zużycia w wyniku skrawania w przypadku badań materiałów kruchych np. beton czy podłoże skalne, zwłaszcza gdy są one narażone na działanie strumienia cząstek o zaokrąglonych ziarnach, co ma miejsce w systemach rzecznych [23].

W związku z tym Sklar i Dietrich [24] zaproponowali model skupiający się głównie na zużyciu uderowym. Podstawowa forma modelu jest zdefiniowana w następujący sposób:

$$E = V_i I_r F_e \quad (3)$$

gdzie: E to szybkość ścierania podłoża skalnego, V_i oznacza średnią objętość skały oderwanej przez uderzenie, I_r oznacza częstotliwość uderzeń cząstek na jednostkę powierzchni w jednostce czasu, oraz F_e to część koryta rzeki wystawiona na działanie prądu.

2.3. Modele statystyczne oparte na prawdopodobieństwie

Przykładem modelu statystycznego opartego na prawdopodobieństwie może być model do przewidywania zużycia ściernego betonu opracowany przez Dandapata i

Deba [8]. W modelu tym przepływ osadów ścierający beton definiuje się jako ciągłe warstwy sedymentacyjne docierające do powierzchni betonu. Opierając się na takim założeniu, całkowity ubytek masy ścierania można obliczyć, kumulując uszkodzenia ze wszystkich warstw. Założenia modelu opierają się głównie na wpływie geometrii kruszywa wchodzącego w skład rumowiska na uszkodzenia betonu wywołane ścieraniem. Główne założenia modelu opisano zależnością:

$$M_{eroded}(t) = \sum_{i=1}^{n_g} \left(M_{exposed}^{total} \right)^i \times \rho_i \quad (4)$$

gdzie: M_{eroded} - starta masa betonu wywołana działaniem jednej warstwy kruszywa w jednostce czasu t ,

$\left(M_{exposed}^{total} \right)^i$ – oznacza całkowitą masę kruszywa ściernego na narażonym obszarze betonu,

ρ_i – jest rozkładem prawdopodobieństwa warunkowego kruszywa,

i – liczba warstw sedymentacyjnych.

Model nie uwzględnia wpływu innych kluczowych parametrów takich jak warunki przepływu czy właściwości betonu.

2.4. Modele oparte na uczeniu maszynowym

Modele predykcyjne ustanowione w oparciu o metodologię uczenia maszynowego mogą znacznie poprawić dokładność prognozowania i zapewnić możliwość zastosowania w bardziej ogólnych warunkach. Gencel i in. [25] opracowali model uwzględniający wpływ składu betonu (zawartość kruszywa, zawartości cementu) i warunków obciążenia zewnętrznego na zachowanie betonu podczas ścierania. Uzyskane przez nich wyniki pokazały, że modele stworzone w oparciu o metodyki uczenia maszynowego wykazywały lepszą wydajność predykcyjną w porównaniu z ogólnymi modelami liniowymi. Ghafoori i in. [26] zbudowali modele predykcyjne oparte na metodologiach uczenia maszynowego przy użyciu zbioru danych uzyskanych z testów ASTM C779. Podobnie Malazdrewicz i Sadowski [27] opracowali modele oparte na eksperymentalnych zapisach testów ASTM C944. W pracy [28] przyjęto dwie metodologie uczenia maszynowego, tj. lasy losowe (RFs) i sztuczne sieci neuronowe (ANN), do przewidywania głębokości ścierania betonu na podstawie 690 punktów danych eksperymentalnych, w których uwzględniono 12 parametrów wpływających na złożoność uszkodzeń spowodowanych ścieraniem konstrukcji hydrotechnicznych. W przypadku modeli opartych na niewielkim zbiorze danych pochodzących z konkretnego studium przypadku ich zastosowanie w innych warunkach pracy konstrukcji może nie być właściwe, dlatego pożądany jest jak największy zbiór danych eksperymentalnych.

3. Test ścieralności i metody kwantyfikacji uszkodzeń

Metod badań ścieralności betonu jest bardzo wiele, część z nich została znormalizowana, jednak tylko niewielka ilość jest adresowana do badania ścieralności betonu w konstrukcjach hydrotechnicznych. Główne, powszechnie stosowane metody badania ścieralności wymieniono w tabeli 2.

Tabela 2. Analiza porównawcza różnych metod badań ścieralności.

Metoda	Typ	Pomiar	Zalety	Wady	Aplikacja
Norma ASTM C418 [29]	Piaskowanie próbek	Stosunek utraty objętości do powierzchni ścierania	Symuluje działanie piasków ściernych. Możliwość kontroli pod kątem stopnia uszkodzenia wywołanego ścieraniem	Ścierniwo w postaci piasku jest niewielkich rozmiarów i jest transportowane przez powietrze pod wysokim ciśnieniem, a nie przez wodę.	Ocena odporności betonu na ścieranie konstrukcji hydrotechnicznych
Norma ASTM C779 [30]	Procedura A - głowice ścierające Procedura B – głowice z kołami zębatymi Procedura C- głowice z łożyskiem kulkowym	Głębokość ścierania	Procedury testowe różnią się rodzajem i stopniem siły ściernej. Skracają czas badania	Procedury testowe są wykonywane bez użycia wody. Można symulować tylko mechanizmy tarcia suchego. Wystarczające ścieranie może nie zostać osiągnięte z uwagi na słabe obciążenie.	Pomiar odporności betonu na ścieranie chodników i podłóg
Norma ASTM C944 [31]	Obracający się trzpień z kołami zębatymi	Głębokość ścierania lub ubytek masy	Skuteczny do szacowania uszkodzeń spowodowanych ścieraniem betonu drogowego i mostowego, poddanego głównie obciążeniom ściskającym.	Można symulować tylko rowkowanie spowodowane tarciem na sucho. Nie jest reprezentatywna dla hydroabrazji.	Szacowanie odporności betonu na ścieranie autostrad i mostów
Norma ASTM C1138 [32]	Kule stalowe wprowadzane w ruch wirowy w wodzie	Utrata masy lub szybkość utraty masy	Nadaje się do badania ścierania wywołanego toczaniem się, ślizganiem i uderzaniem. Zmniejsza koszty eksperymentów.	Wyraźne różnice w kształcie między stalowymi kulkami a cząstkami przenoszonymi przez wodę. Długi czas badania (72 h) dla pojedynczej próby.	Ocena odporności betonu na ścieranie konstrukcji hydrotechnicznych

Metoda	Typ	Pomiar	Zalety	Wady	Aplikacja
Tarcze obrotowe [3, 33]	1. Metoda tarczy Böhmego 2. Metoda szerokiej tarczy	Ubytek masy, ubytek objętości, głębokość ścierania	Nadaje się do badania ścierania wywołanego szlifowaniem	Procedura testowa nie jest reprezentatywna dla hydroabrazji. Długi czas badań.	Szacowanie odporności betonu na ścieranie dróg i autostrad
Uderzenie piasku transportowanego przez wodę [15], [34], [35], [36]		Utrata masy, utrata objętości, głębokość ścierania lub szybkość ścierania	Duże podobieństwo do przepływu rumowiska rzeczno-ego. Można modelować wiele mechanizmów ścierania, w tym deformację uderzeniową, zużycie tnące i zarysowania ślizgowe.	Trudno jest osiągnąć pożądany skład osadu i zapewnić jednorodność przepływu. Modelowanie różnych warunków przepływu (np. prędkość przepływu, kształt ścierniwa i zawartość osadów) są ograniczone.	Ocena odporności betonu na ścieranie konstrukcji hydrotechnicznych
Wysokociśnieniowy strumień hydro-ścierny [4, 37, 38]		Utrata masy, utrata objętości, głębokość ścierania lub szybkość ścierania	Przyspiesza proces ścierania dzięki szybkiemu przepływowi. Stosowana przy dużych prędkościach przepływu. Skuteczny w testowaniu względnej odporności na ścieranie różnych betonów, w tym BWW.	Koncentracja naprężeń może wystąpić z powodu strumienia wody o wysokim ciśnieniu działającego na małą powierzchnię. Prędkość przepływu pod wysokim ciśnieniem jest większa niż w warunkach naturalnych	Ocena odporności betonu na ścieranie konstrukcji hydrotechnicznych
Skalowany model fizyczny w postaci kanału [39], [40], [41], [42]		Głębokość ścierania	Duże podobieństwo do warunków polowych. Zaawansowany system rejestracji danych.	Możliwość przeniesienia wyników uzyskanych ze skalowanych testów modeli fizycznych do zastosowań	Ocena odporności betonu na ścieranie konstrukcji hydrotechnicznych

Metoda	Typ	Pomiar	Zalety	Wady	Aplikacja
				terenowych jest trudna ze względu na potencjalne efekty skali.	
Ścieranie in-situ [6, 43]		Głębokość ścierania	Dokładne dane dotyczące uszkodzeń spowodowanych ścieraniem.	Pomiar terenowy konstrukcji hydraulicznych jest trudny. Testy in-situ są kosztowne.	

Na rysunku 1 przedstawiono najbardziej typowe metody badań ścieralności betonu. Normowa metoda badawcza ASTM C1138 [32] zwana również „metodą podwodną” (Rys. 1 a) jest reprezentatywna dla oceny względnej odporności betonu na ścieranie betonu w konstrukcjach hydrotechnicznych i stosowana przez bardzo wielu badaczy na całym świecie. W krajach UE bardziej popularne są metody badania ścieralności betonu z wykorzystaniem tarcz, w Polsce od dziesięcioleci stosowana jest metoda tarczy Böhmego [33]. Metoda ta nie nadaje się do oceny ścieralności betonu dla konstrukcji hydrotechnicznych, podobnie jak wprowadzona w ramach norm europejskich metoda szerokiej tarczy [33], która nie przyjęła się w Polsce do oceny ścieralności betonu. Metody testowe oparte na modelu fizycznym, w postaci specjalnych kanałów zapewniają bliskie podobieństwo do warunków terenowych [39]. Powyższe metody badawcze odtwarzają typowy przepływ rumowiska dla istniejących lub projektowanych konstrukcji, z różnym powodzeniem, aby symulować uszkodzenia spowodowane ścieraniem betonu. Jednak ze względu na złożoność i różnorodność warunków hydraulicznych, wyniki uzyskane z testów laboratoryjnych wydają się znacznie różnić, a zatem przydatność uzyskanych wyników laboratoryjnych jest ograniczona możliwościami technicznymi tuneli. Wykonuje się również badania ścieralności in-situ, które dostarczają wyników bezpośrednio z terenu [43] jednak są one nieliczne i bardzo kosztowne.



Rys. 1. Typowe metody badań ścieralności betonu: a) schemat urządzenia wg metody ASTM C1138 [32], (b) próbka po zakończeniu badania wg STM C1138, c) Metoda tarczy Böhme [33], d) badanie próbki wg metody ASTM C944 [31] e) kanał do badania przepływów i ścieralności betonu

4. Podsumowanie

Podsumowując, należy zauważyć, że nie ma pojedynczych testów, które mogłyby odpowiednio ocenić odporność betonu na ścieranie w konstrukcjach hydrotechnicznych we wszystkich możliwych warunkach. Inną ważną kwestią jest to, że podobieństwo między badaniami laboratoryjnymi a warunkami polowymi jest niewielkie, ponieważ naturalne warunki polowe są złożone i wiążą się z dużymi obciążeniami. Wiarygodność i reprezentatywność metod laboratoryjnych do badania złożonych zjawisk ścierania zależy w dużej mierze od ich zdolności do odpowiedniego symulowania rzeczywistych warunków.

Uszkodzenia betonu spowodowane ścieraniem są spowodowane głównie działaniami mechanicznymi, w tym cięciem, ścieraniem i uderzeniami, podczas gdy w warunkach polowych beton może być również narażony na procesy chemiczne i fizykochemiczne, np. zamarzanie i rozmrażanie oraz korozję chemiczną. W większości przypadków badania ścieralności przeprowadza się bez jednoczesnego uwzględnienia innych mechanizmów degradacji. Aby odzwierciedlić przypadki terenowe, ważne jest badanie efektów sprzęgania kilku mechanizmów degradacji, co również wydaje się istotną luką badawczą do wypełnienia.

Badania nad uszkodzeniami wywołanymi ścieraniem betonu dla konstrukcji hydrotechnicznych pod wpływem różnych obciążeń środowiskowych lub mechanizmów degradacji mają dużą wartość, ponieważ mogą być bardziej reprezentatywne w warunkach polowych.

Przewidywanie uszkodzeń betonu spowodowanych ścieraniem jest bardzo ważnym tematem. Modele empiryczne można stosować w celu ustalenia związku między uszkodzeniami spowodowanymi ścieraniem betonu a parametrem wpływającym. Nie można za ich pomocą skutecznie odzwierciedlić wpływu innych czynników wpływających na uszkodzenia betonu spowodowane ścieraniem. Modele opracowane w oparciu o metodologię uczenia maszynowego są najbardziej obiecujące w przewidywaniu uszkodzeń betonu spowodowanych ścieraniem. Tego rodzaju modele uwzględniają większość istotnych parametrów wpływających zgodnie z uzyskanym zbiorem danych, dzięki czemu można je wykorzystać do kompleksowej oceny betonu narażonego na złożone warunki środowiska.

Na koniec należy podkreślić, że obecne przepisy projektowe i zalecenia dotyczące projektowania betonu odpornego na ścieranie (o ile w ogóle występują) zawierają bardzo ograniczone informacje. Współpraca i przepływ informacji pomiędzy potrzebami przemysłu a badaniami naukowymi jest tu kluczowym zagadnieniem. Trwałe i zrównoważone betonowe konstrukcje hydrotechniczne o doskonałej odporności na ścieranie można osiągnąć tylko dzięki wspólnym wysiłkom zarówno środowiska akademickiego, jak i przemysłu.

Literatura

- [1] M. Müller-Hagmann, I. Albayrak, C. Auel, R.M. Boes: Field investigation on hydroabrasion in high-speed sediment-laden flows at sediment bypass tunnels. Water., Vol.12 (2020), pp. 10-16.
- [2] E.K. Horszczaruk. Hydro-abrasive erosion of high performance fiber-reinforced concrete Wear, 267 (2009), pp. 110-115.
- [3] E. Horszczaruk, P. Brzozowski: Effects of fluidal fly ash on abrasion resistance of underwater repair concrete. Wear, Vol. 376-377 (2017), pp. 15-21.

- [4] A.W. Momber: Effects of erodent flow energy and local exposure time on the erosion of cement-based composites at high-speed hydro-abrasive flow. *Wear*, Vol. 378–379 (2017), pp. 145-154.
- [5] Y.W. Liu: Improving the abrasion resistance of hydraulic-concrete containing surface crack by adding silica fume. *Construction and Building Materials*, 21 (2007), pp. 972-977.
- [6] F. Jacobs, W. Winkeler, F. Hinkeler, P. Volkart: *Beton Im Wasserbau*. *Beton*, 1 (2003), pp. 16-23
- [7] S.R. Abid, M.S. Shamkhi, N.S. Mahdi, Y.H. Daek: Hydro-abrasive resistance of engineered cementitious composites with PP and PVA fiber. *Construction and Building Materials*, 187 (2018), pp. 168-177.
- [8] R. Dandapat, A. Deb: A probability based model for the erosive wear of concrete by sediment bearing water. *Wear*, Vol. 350–351 (2016), pp. 166-181.
- [9] S.R. Abid, M.S. Shamkhi, N.S. Mahdi, Y.H. Daek: Hydro-abrasive resistance of engineered cementitious composites with PP and PVA fiber. *Construction and Building Materials*, 187 (2018), pp. 168-177.
- [10] Z. Sun, Q. Xu: Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete. *Materials Science and Engineering: A*, 527 (2009), pp. 198-204.
- [11] A.F.H. Sherwani, R. Faraj, K.H. Younis, A. Daraei: Strength, abrasion resistance and permeability of artificial fly-ash aggregate pervious concrete. *Case Study in Construction Materials*, 14 (2021), e00502.
- [12] E. Horszczaruk: Abrasion resistance of high-strength concrete in hydraulic structures *Wear*, 259 (2005), pp. 62-69.
- [13] T. Yen, T.H. Hsu, Y.W. Liu, S.H. Chen: Influence of class F fly ash on the abrasion-erosion resistance of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 21 (2007), pp. 458-463.
- [14] R. Siddique, K. Kapoor, E.H. Kadri, R. Bennacer: Effect of polyester fibres on the compressive strength and abrasion resistance of HVFA concrete. *Construction and Building Materials*, 29 (2012), pp. 270-278.
- [15] Y.W. Liu, T. Yen, T.H. Hsu: Abrasion erosion of concrete by water-borne sand *Cement and Concrete Research*, 36 (2006), pp. 1814-1820.
- [16] S. Pyo, S.Y. Abate, H.K. Kim: Abrasion resistance of ultra high performance concrete incorporating coarser aggregate. *Construction and Building Materials*, 165 (2018), pp. 11-16.
- [17] E. Horszczaruk: Abrasion resistance of high-strength concrete in hydraulic structures, *Wear*, 259 (2005), pp. 62-69.
- [18] Q. Deng, R. Zhang, C. Liu, Z. Duan, J. Xiao: Influence of fiber properties on abrasion resistance of recycled aggregate concrete: Length, volume fraction, and types of fibers. *Construction and Building Materials*, 362 (2023), Article 129750.
- [19] X.G. Hu, A.W. Momber, Y. Yin, H. Wang, D.M. Cui: High-speed hydrodynamic wear of steel-fibre reinforced hydraulic concrete. *Wear*, 257 (2004), pp. 441-450.
- [20] X. Hu, A.W. Momber, Y. Yin: Hydro-abrasive erosion of steel-fibre reinforced hydraulic concrete. *Wear*, 253 (2002), pp. 848-854.
- [21] J.G.A. Bitter: A Study of Erosion Phenomena Part I. *Wear*, 6 (1963), pp. 169-190.
- [22] T. Ishibashi: A hydraulic study on protection for erosion of sediment flush equipments of dams. *Proc. Jpn. Soc. Civ. Eng.*, 334 (1983), pp. 103-112.

- [23] W.J. Head, M.E. Harr: The development of a model to predict the erosion of materials by natural contaminants. *Wear*, 15 (1970), pp. 1-46.
- [24] L.S. Sklar, W.E. Dietrich: The role of sediment in controlling steady-state bedrock channel slope: Implications of the saltation–abrasion incision model. *Geomorphology*, 82 (2006), pp. 58-83.
- [25] O. Gencil, F. Kocabas, M.S. Gok, F. Koksai: Comparison of artificial neural networks and general linear model approaches for the analysis of abrasive wear of concrete. *Construction and Building Materials*, 25 (2011), pp. 3486-3494.
- [26] N. Ghafoori, M. Najimi, J. Sobhani: Modelling the abrasion resistance of self-consolidating concrete. *Magazine of Concrete Research*, 67 (2015), pp. 938-953.
- [27] S. Malazdrewicz, Ł. Sadowski: An intelligent model for the prediction of the depth of the wear of cementitious composite modified with high-calcium fly ash *Composites Structures*, 259 (2021), Article 113234.
- [28] S. Malazdrewicz, Ł. Sadowski: Neural modelling of the depth of wear determined using the rotating-cutter method for concrete with a high volume of high-calcium fly ash. *Wear*, 477 (2021), Article 203791.
- [29] The American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting, ASTM C418-98. (1999) 1–3.
- [30] The American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces, ASTM C 779/C 779M - 05. (2002) 1–6.
- [31] The American Society for Testing and Materials, Standard test method for abrasion resistance of concrete or mortar surfaces by the rotating-cutter method, ASTM C944-99. (1999) 1–4.
- [32] The American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method), ASTM C1138-97. (1997) 1–4.
- [33] *PN-EN 14157:2017-11*. Metody badań kamienia naturalnego -- Oznaczanie odporności na ścieranie.
- [34] S.R. Abid, M.S. Shamkhi, N.S. Mahdi, Y.H. Daek: Hydro-abrasive resistance of engineered cementitious composites with PP and PVA fiber. *Constr. Build. Mater. J.*, 187 (2018), pp. 168-177.
- [35] N. Zarrabi, M.N. Moghim, M.R. Eftekhar: Effect of hydraulic parameters on abrasion erosion of fiber reinforced concrete in hydraulic structures. *Constr. Build. Mater.*, 267 (2021), Article 120996.
- [36] Z.J. Grdic, G.A.T. Curcic, N.S. Ristic, I.M. Despotovic: Abrasion resistance of concrete micro-reinforced with polypropylene fibers. *Constr. Build. Mater.*, 27 (2012), pp. 305-312.
- [37] H. Hocheng, C.H. Weng: Hydraulic erosion of concrete by a submerged jet *J. Mater. Eng. Perform.*, 11 (2002), pp. 256-261.
- [38] J. Liu, S. Du, Y. Xue: Study on the breaking process and damage characteristics of abrasive water jet impacting concrete based on acoustic emission. *Constr. Build. Mater.*, 262 (2020), Article 120085.
- [39] C. Auel, *Flow Characteristics, Particle Motion And Invert Abrasion In Sediment Bypass Tunnels*, ETH Zurich, 2014.
- [40] M. Facchini, *Hydroabrasion in high speed flow at sediment bypass tunnels*, ETH Zürich, 2017.

- [41] T. Inoue, N. Izumi, Y. Shimizu, G. Parker: Interaction among alluvial cover, bed roughness, and incision rate in purely bedrock and alluvial-bedrock channel. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 119 (2014), pp. 2123-2146
- [42] M.P. Lamb, N.J. Finnegan, J.S. Scheingross, L.S. Sklar: New insights into the mechanics of fluvial bedrock erosion through flume experiments and theory. *Geomorphology*, 244 (2015), pp. 33-55.
- [43] A. Kryżanowski, M. Mikoš, J. Šušteršič, V. Ukrainczyk, I. Planinc: Testing of concrete abrasion resistance in hydraulic structures on the Lower Sava River. *Journal of Mechanical Engineering* 58(2012)4, 245-25.