

dr hab. inż. Ewelina Korol¹⁾

ORCID: 0000-0003-4151-8618

mgr inż. Arkadiusz Jenta¹⁾

ORCID: 0009-0000-6891-355X

dr inż. Ojas Arun Chaudhari²⁾

ORCID: 0000-0002-4182-5653

dr hab. inż. Michał Wójcik^{1*)}

ORCID: 0000-0003-4514-1408

Experimental investigation of concrete beams under bending, manufactured with 3D additive printing technology

Badania doświadczalne zginanych belek betonowych wytworzonych techniką przyrostowego druku 3D

DOI: 10.15199/33.2025.11.01

Abstract. The article presents results of experimental research performed on concrete beams under bending, manufactured using additive 3D printing method. The aim of the research was to determine the nominal flexural strength affected by varying: layer orientation, geometry of a single layer and beam size. The results showed that the strength of beams with layers perpendicular to the load direction is several times higher than those with parallel layers, and significantly lower when the beam dimensions increase.

Keywords: concrete; 3D printing; strain localization; size effect; additive manufacturing.

Streszczenie. Artykuł przedstawia wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych na belkach betonowych, wytworzonych przyrostową metodą druku 3D. Celem badań było określenie wytrzymałości nominalnej na zginanie, będącej pod wpływem zmiennych: układu warstw; geometrii pojedynczej warstwy oraz wielkości belki. Wyniki badań wykazały, że nośność belek z warstwami prostopadłymi do kierunku obciążenia jest wielokrotnie większa niż z warstwami równoległymi oraz znacznie mniejsza, gdy wymiary belki wzrastają.

Słowa kluczowe: beton; druk 3D; lokalizacja odkształceń; efekt skali; metoda przyrostowa.

The history of innovative 3D printing began in the 1980s, with the creation of pioneering devices that enabled the fabrication of three-dimensional objects from digital models [1, 2]. Additive 3D printing technology, which utilizes materials such as thermoplastics for the iterative layering of thin layers to build a complete model, has gained significant popularity.

The most commonly used raw materials for 3D printing are plastics such as PLA and ABS in the form of filament wound on a spool, enabling the production of prototypes even in home conditions. Professional, industrial printing devices are adapted to produce objects from materials such as metals, ceramics or concrete.

The past decade has seen intensive research on the implementation of additive printing technology in construction, both for the production of individual structural elements and entire buildings. Examples of impressive implementations on a global scale are: a two-story house in China (400 m², HuaShang Tengda); office buildings in Dubai (250 m², Winsun) and a children's castle in Minnesota, USA (Total Kustom) [1 – 2]. In Poland, the first building made using 3D printing technology was built in Otrębusy (Mazowieckie Voivodeship), constructed by the local company REbuild [3]. Potential benefits and challenges arising from the use of 3D printing technology have been described, among others, in [4, 5, 6]. Key

historia innowacyjnego druku 3D rozpoczęła się w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku, gdy powstały pionierskie urządzenia umożliwiające wytworzenie trójwymiarowego obiektu na podstawie jego cyfrowego modelu [1, 2]. Największą popularność zyskała technologia przyrostowa druku 3D, która wykorzystuje m.in. materiały termoplastyczne do iteracyjnego układania cienkich warstw jedna na drugiej, aż do powstania kompletnego modelu.

Najczęściej wykorzystywanymi surowcami do druku 3D są tworzywa sztuczne typu PLA i ABS w postaci żyłki nawiniętej na szpulę, umożliwiającej produkcję prototypów nawet w warunkach domowych. Profesjonalne, przemysłowe urządzenia drukujące, przystosowane są do wytwarzania obiektów z takich materiałów jak metale, ceramika czy beton.

Miniona dekada to intensywne prace badawcze nad wdrożeniem techniki druku przyrostowego w budownictwie, zarówno do produkcji pojedynczych elementów konstrukcyjnych, jak i całych obiektów budowlanych. Przykładami imponujących realizacji w skali całego świata są: dwupiętrowy dom w Chinach (400 m², HuaShang Tengda); budynki biurowe w Dubaju (250 m², Winsun) i dziecięcy zamek w Minnesocie, USA (Total Kustom) [1 – 2]. W Polsce pierwszy budynek wykonany w technologii druku 3D powstał w Otrębusach (mazowieckie), wzniesiony przez rodzimą firmę REbuild [3]. Potencjalne korzyści oraz wyzwania wynikające z zastosowania technologii druku 3D zostały opisane m.in. w [4, 5, 6]. Wśród nich warto wymienić automatyzację procesu; optymalizację ilości zużytego materiału; redukcję czasu i nakładu

¹⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

²⁾ RISE Research Institute of Sweden

^{*)} Correspondence address: michal.wojcik@pg.edu.pl

aspects include process automation, optimization of the amount of used material, reduction of time and labor input, Precise construction and reduced number of errors.

A commonly used additive method of manufacturing concrete elements involves the precise laying of thin layers of cementitious mortar, one on top of the other, which, by binding together, allow to obtain a compact structure. The key to this method is the design of a fresh cementitious mortar [7 – 11], which is characterized by: appropriate consistency enabling pumping, extrusion and squeezing through an extruder, thixotropy ensuring shape stability, durable interlayer bonding and the ability to build subsequent layers.

In order to obtain a correct print, it is also necessary to select an appropriate extruding head movement speed and nozzle diameter, as well as the ratio of the height to the width of a single layer [12 – 15]. At the interface of the laid layers, a contact zone is formed, where chemical and physical bonding occurs. It has different properties than a hardened cementitious mixture and has a large impact on the cracking process and element load-bearing capacity. As a result of additive manufacturing, an orthotropic concrete element is created, the properties of which depend on the orientation of the layers in relation to the direction of the applied load, the geometry of a single layer and the properties of the contact zone at the layer interface.

The aim of the conducted research was to investigate the mechanical properties of printed beams, such as load-bearing capacity, failure mechanism, and brittleness. The research program was planned in such a way that it would be possible to experimentally verify the effect on the obtained results of:

- a) layer orientation;
- b) variable geometry of a single layer and contact zone;
- c) variable geometry of the entire sample.

Materials and Tests Set-up

A commercial 3D printing mixture containing Portland cement and aggregate with a maximum diameter of 1 mm was used to manufacture the beams. The samples were made at the Swedish research institute RISE, located in Borås, using an ABB IRB 6700 printing robot with six degrees of freedom, controlled by AdaOne software. The mixing and pumping of ingredients through pipes to the extruder head was carried out by a MAI MULTI-MIX-3D pump, controlled by a VERTICO panel, which controlled the amount of water dosed, temperature and pressure. A single-component system was used, without modifying the consistency of the mixture in the head with additives. In this case, water dosing is crucial to achieve the desired consistency of the mixture, which is correlated with the printing speed and ensures appropriate flow and surface tension parameters between successive layers. A properly designed mixture guarantees load-bearing support for subsequent layers and bonding between them.

Beams were divided into three series depending on the investigated characteristic. Series 1 includes beams without a notch, designed to determine the influence of different layer orientations v.u., w.u., and u.w. (Figure 1) on the nominal flexural strength. The first letter in the designation indicates

pracy; precyzję wykonania oraz ograniczenie błędów wykonawczych.

Powszechnie stosowana metoda przyrostowa wytwarzania elementów betonowych polega na precyzyjnym układaniu cienkich warstw zaprawy cementowej, jedna na drugiej, które wiążąc ze sobą, pozwalają uzyskać zwartą strukturę. Kluczowe w tej metodzie jest zaprojektowanie świeżej mieszanki [7 – 11], którą charakteryzuje: odpowiednia konsystencja umożliwiająca pompowanie; tłoczenie i wyciskanie przez ekstruder; tiksotropowość zapewniająca stabilność kształtu; wytrzymałe wiązanie międzywarstwowe; możliwość nadbudowy kolejnych warstw.

W celu uzyskania poprawnego wydruku należy również dobrać odpowiednią prędkość przemieszczania głowicy oraz jej średnicę, a także relację wysokości do szerokości pojedynczej warstwy [12 – 15]. Na styku układanych warstw tworzy się strefa kontaktu, gdzie zachodzi chemiczne i fizyczne wiązanie. Ma ona inne właściwości niż stwardniała jednorodna mieszanka i duży jest jej wpływ na proces pęknięcia i nośność elementu. W efekcie przyrostowego wytwarzania powstaje ortotropowy element betonowy, którego właściwości zależą od orientacji warstw względem kierunku przyłożonego obciążenia, geometrii pojedynczej warstwy oraz właściwości strefy kontaktu na granicy warstw.

Celem prowadzonych badań była ocena mechanicznych właściwości drukowanych belek, takich jak nośność, mechanizm zniszczenia i kruchość. Program badań został zaplanowany w taki sposób, aby możliwe było doświadczalne zweryfikowanie wpływu na otrzymane wyniki:

- a) orientacji warstw;
- b) zmiennej geometrii pojedynczej warstwy oraz strefy kontaktu;
- c) zmiennej geometrii całej próbki.

Materiały i opis badań

Do wytworzenia belek wykorzystano komercyjną mieszankę do druku 3D, zawierającą cement portlandzki i kruszywo o maksymalnej średnicy 1 mm. Próbkę została wykonana w szwedzkim instytucie badawczym RISE z siedzibą w Borås, z zastosowaniem robota drukującego ABB IRB 6700 o sześciu stopniach swobody, sterowanego oprogramowaniem AdaOne. Mieszanie i pompowanie składników przewodami do głowicy odbywało się pompą MAI®MULTI-MIX-3D, sterowaną panelem VERTICO, która kontrolowała ilość dozowanej wody, temperaturę i ciśnienie. Zastosowano system jednokomponentowy, bez modyfikacji domieszkami konsystencji mieszanki w głowicy. W tym przypadku kluczowe jest dozowanie wody w celu osiągnięcia żądanej konsystencji mieszanki, która jest skorelowana z prędkością druku oraz zapewnia odpowiednie parametry rozprywu i napięcia powierzchniowego między kolejnymi warstwami. Właściwie zaprojektowana mieszanka gwarantuje nośne podparcie kolejnych warstw i wiązanie między nimi.

Belki podzielono na trzy serie, w zależności od badanej cechy. Seria 1, to belki bez nacięcia, zaprojektowane w celu określenia wpływu różnej orientacji warstw v.u., w.u. i u.w. (rysunek 1) na wytrzymałość nominalną belki na zginanie. Pierw-

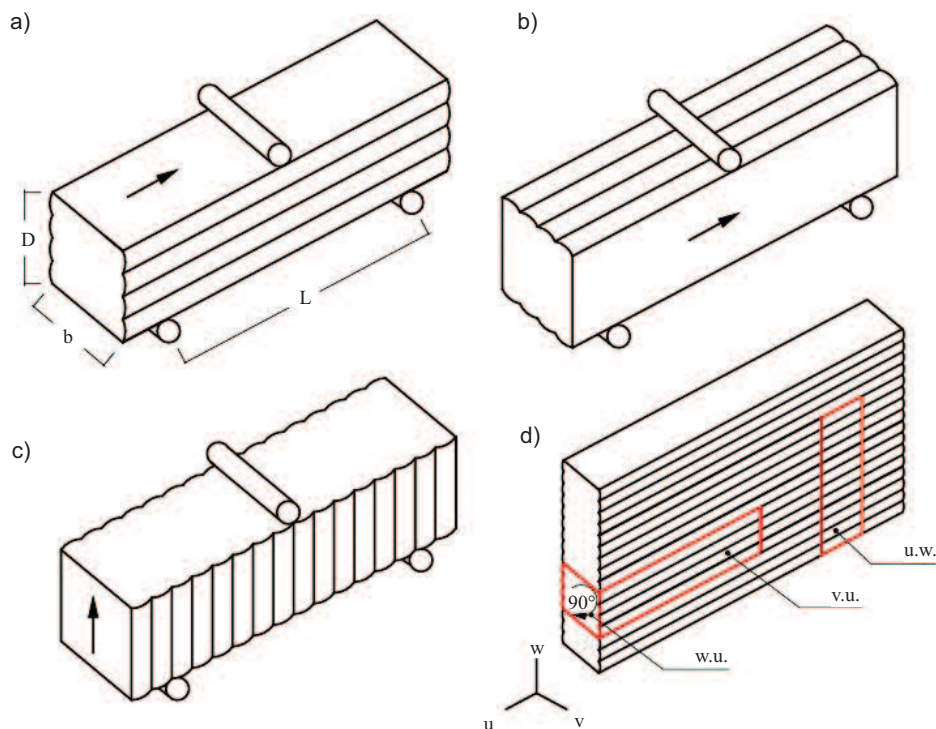


Fig. 1. Orientation of the sample layers: a) v.u., b) w.u.; c) u.w. (→ printing direction); d) method of cutting and marking the samples
Rys. 1. Orientacja warstw próbek a) v.u.; b) w.u.; c) u.w. (→ kierunek drukowania); d) sposób wycięcia i oznaczenia próbek

the load direction while the second letter indicates the longitudinal axis direction of the specimen. The geometry of the specimens $Leff \times D \times b$ ($Leff$ – support spacing, D – beam height, b – beam width) was adopted in accordance with the recommendation of the RILEM technical committee [16]: $120 \times 40 \times 40$ mm. Series 2 also includes beams without a notch, made to investigate the influence of the geometry of a single layer. Beams with dimensions of $180 \times 60 \times 60$ mm were printed in two variants, first of a single layer 10×20 mm and second of a single layer 15×30 mm. Series 3 includes beams notched at the bottom, used to verify the phenomenon of a size effect, i.e. the influence of a specimen size on nominal flexural strength and brittleness (illustrated by the slope of the curve in the weakening phase, i.e. after exceeding the maximum force). Geometrically similar beams were printed in three sizes, scaled simultaneously in the height and length direction: $120 \times 40 \times 40$ mm (small); $240 \times 80 \times 40$ mm (medium) and $360 \times 120 \times 40$ mm (large).

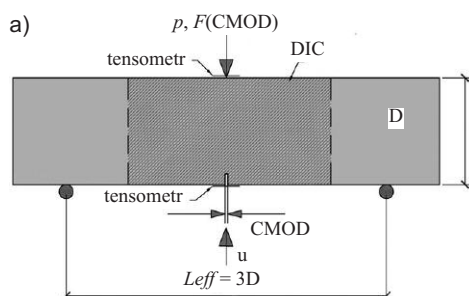
Beams were cured in water for 6 weeks, and then tests were started. Some of the beams were tested in a damp condition, i.e. they were removed from the water and dried with a towel on the day of the test. The remaining beams were tested after a minimum of five days of natural drying in laboratory conditions. Three-point bending tests were performed on the Instron 5569 testing machine. Beams without a notch (series 1 and 2) were loaded by controlling the piston displacement, and notched beams (series 3) had a controlled crack mouth opening displacement (CMOD) increase. Additional tests were also performed (in a hydraulic press) to determine the compressive strength of the printed cementitious mixture with different layer orientations. Similarly to series 1, three variants were tested: v.u., w.u., and u.w. on cubes with dimensions of $40 \times 40 \times 40$ mm.

szła litera w oznaczeniu warstw oznacza kierunek przyłożenia obciążenia, a druga kierunek osi podłużnej elementu. Geometria próbek $Leff \times D \times b$ ($Leff$ – rozstaw podpór, D – wysokość belki, b – szerokość belki) przyjęta była zgodnie z rekomendacją komitetu technicznego RILEM [16]: $120 \times 40 \times 40$ mm. Seria 2, to także belki bez nacięcia, wykonane do oceny wpływu geometrii pojedynczej warstwy. Belki o wymiarach $180 \times 60 \times 60$ mm wydrukowano w dwóch wariantach: z pojedynczej warstwy 10×20 mm oraz 15×30 mm. Seria 3, to belki nacięte na spodzie, służące do weryfikacji zjawiska efektu skali, czyli wpływu wielkości próbki na wytrzymałość nominalną na zginanie oraz kruchość, zilustrowanej nachyleniem krzywej w fazie osłabienia, tj. po przekroczeniu siły maksymalnej. Wydrukowano belki geometrycznie podobne w trzech wielkościach skalowanych jednocześnie po wysokości i długości: $120 \times 40 \times 40$ mm (mała); $240 \times 80 \times 40$ mm (średnia) oraz $360 \times 120 \times 40$ mm (duża).

Belki dojrzewały w wodzie przez 6 tygodni, a następnie przystąpiono do testów. Część belek badano w stanie wilgotnym, tzn. zostały wyjęte z wody i osuszone ręcznikiem w dniu badania. Pozostałe belki badane były po min. pięciu dniach naturalnego suszenia w warunkach pokojowych. Testy 3-punktowego zginania wykonano na maszynie wytrzymałościowej Instron 5569. Belki bez nacięcia (serie 1 i 2) obciążano, kontrolując przemieszczenie tłoka, a belki nacięte (seria 3) miały kontrolowany przyrost rozwarcia rysy. Wykonano także badania towarzyszące (w prasie hydraulicznej) w celu oznaczenia wytrzymałości na ściskanie drukowanej mieszanki, przy różnej orientacji warstw. Analogicznie do serii 1 zbadano trzy warianty: v.u., w.u. i u.w. na kostkach o wymiarach $40 \times 40 \times 40$ mm.

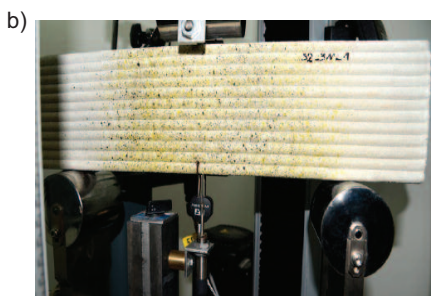
Research Results

In series 1, three-point bending tests were performed on beams without a notch, controlling the displacement of the piston, which initially moved at a speed of 0.015 mm/min to a force of 250 N, and then its speed was reduced to 0.003 mm/min. In accordance with the recommendation of the RILEM technical committee [16], the tests were initially performed on damp specimens. However, moisture negatively affected the strain gauge outcomes, therefore later tests were performed on dry specimens. During the loading process, the force and piston displacement were automatically recorded, and additionally the actual deflection of the beam was measured using an LVDT inductive sensor, placed under the lower edge of the beam in the middle of its span (in series 3, the LVDT sensor measuring the deflection was minimally shifted relative to the middle of the beam's span due to the presence of a notch in this location – Figure 2).



Wyniki badań

W serii 1 wykonano testy 3-punktowego zginania na belkach bez karbu, sterując przemieszczeniem tłoka, który poruszał się początkowo z prędkością 0,015 mm/min do siły 250 N, a następnie jego prędkość została zredukowana do 0,003 mm/min. Zgodnie z zaleceniem komitetu technicznego RILEM [16], testy wykonywane były początkowo na wilgotnych próbkach. Wilgoć wpływała jednak negatywnie na odczyty tensometryczne, dlatego w późniejszym etapie testy prowadzono na próbkach suchych. W trakcie procesu obciążania rejestrowano automatycznie siłę i przemieszczenie tłoka, a dodatkowo rzeczywiste ugięcie belki, za pomocą czujnika indukcyjnego typu LVDT, umieszczonego pod dolną krawędzią belki w środku jej rozpiętości (w serii 3 czujnik LVDT mierzący ugięcie był minimalnie przesunięty względem środka rozpiętości belki ze względu na obecność nacięcia w tym miejscu – rysunek 2).



Markings: p – displacement control (series 1 and 2); F – force controlled by a crack mouth opening displacement (CMOD) (series 3); u – true deflection measured by LVDT transducer; DIC – strain localization zone measured with DIC technique, strain gauges (tensometr) – stress registered in the compressive and tensile zones/Oznaczenia: p – sterowanie przemieszczeniem (seria 1 i 2); F – sterowanie rozwarciem rysy (CMOD) kontrolującym przyrost siły; u – rzeczywiste ugięcie mierzone czujnikiem LVDT; DIC – obszar pomiaru lokalizacji odkształceń na powierzchni betonu; tensometry – odczyt naprężeń w strefie ściskanej i rozciąganej

Fig. 2. Test set-up and measuring scheme of the beams (a) and course of research (b)

Rys. 2. Schemat obciążenia i schemat pomiarowy belek (a) oraz przebieg badań (b)

Figure 3 shows the flexural stress-deflection curves, obtained in series 1 of dry beams (a) and damp beams (b) for three different layer orientations (v.u., w.u., and u.w.). Bending stresses were calculated using the formula:

$$\sigma = 1,5FL/bD^2 \quad [1]$$

where:

F – force applied at the center of the span.

The results clearly indicate that **the moisture content of the specimens significantly affected the test results**, both the obtained **failure forces and the brittleness of the beams**. The average nominal flexural strength ($f_r = 1,5F_{\max}L/bD^2$, $F_{\max}$ – breaking force), in the case of v.u. orientation, was $f_r = 7,90$ MPa and $f_r = 2,57$ MPa for dry and damp specimens, respectively. In the case of w. u. orientation, the results indicated $f_r = 8,31$ MPa (dry) and $f_r = 3,24$ MPa (damp), respectively, and in the case of u.w. orientation, an average of $f_r = 3,49$ (dry) and $f_r = 1,37$ MPa (damp) was obtained. The w.u. layer orientation was the most favorable for bending, considering the average strength obtained. Damp beams had significantly lower flexural strength and were less brittle than dry beams. Despite the small dimensions of the specimens and very slow loading, a sudden drop of load was recorded in dry beams.

Rysunek 3 przedstawia zależność naprężenie zginające – ugięcie, otrzymaną w serii 1 belek suchych (a) oraz wilgotnych (b) w przypadku trzech różnych orientacji warstw (v.u., w.u. i u.w.). Naprężenia zginające obliczano ze wzoru:

$$\sigma = 1,5FL/bD^2 \quad [1]$$

gdzie:

F – siła przyłożona w środku rozpiętości.

Wyniki jednoznacznie wskazują, że **wilgotność próbek wpływała w znacznym stopniu na wyniki badań**, zarówno na **otrzymane wartości sił niszczących, jak i kruchość belek**. Średnia wytrzymałość nominalna na zginanie ($f_r = 1,5F_{\max}L/bD^2$, $F_{\max}$ – siła niszcząca), w przypadku orientacji v.u. wyniosła $f_r = 7,90$ MPa i $f_r = 2,57$ MPa odpowiednio próbek suchych i wilgotnych. W przypadku orientacji w. u., wyniki wskazały odpowiednio $f_r = 8,31$ MPa (suche) i $f_r = 3,24$ MPa (wilgotne), a w przypadku orientacji u.w. otrzymano średnio $f_r = 3,49$ MPa (suche) i $f_r = 1,37$ MPa (wilgotne). Orientacja warstw w.u. była najkorzystniejsza przy zginaniu, biorąc pod uwagę otrzymaną średnią wytrzymałość. Belki wilgotne miały znacznie mniejszą wytrzymałość na zginanie i były mniej kruche niż belki suche. Pomimo niewielkich rozmiarów próbek i bardzo wolnego obciążania zarejestrowano nagły spadek siły w belkach suchych.

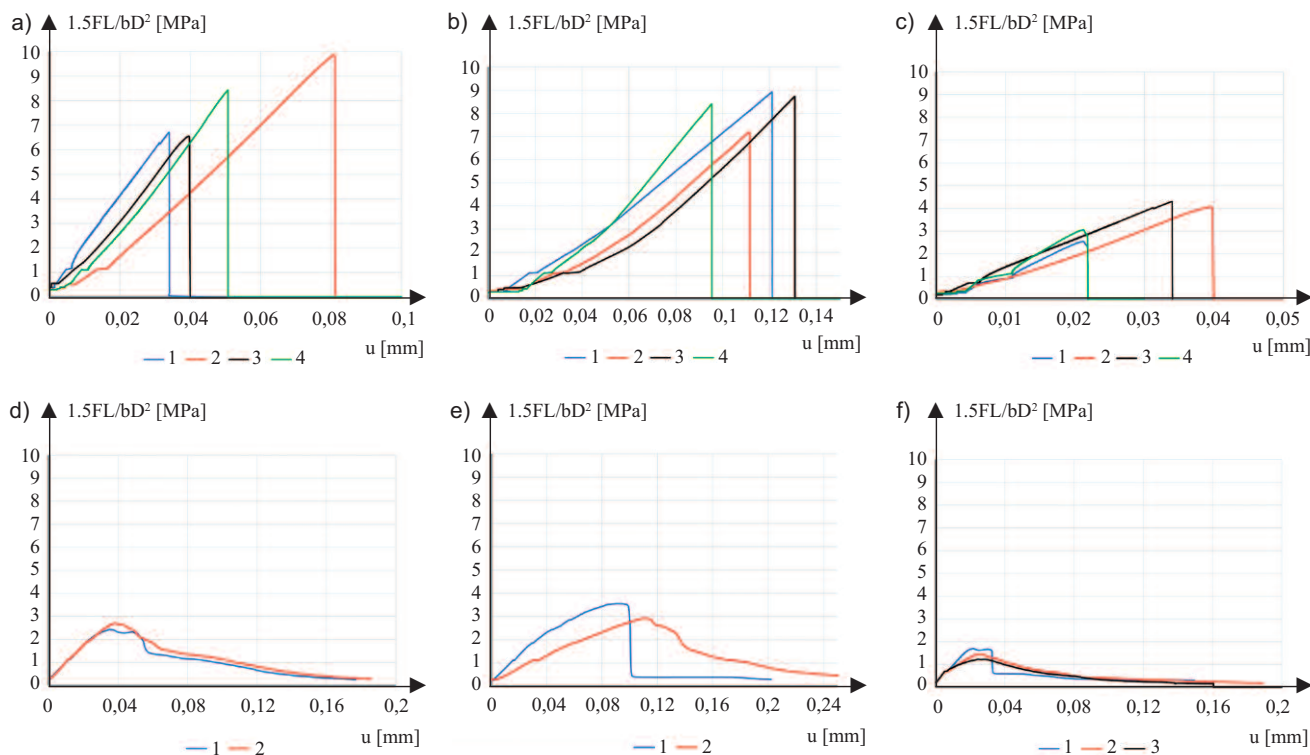


Fig. 3. Flexural stress – deflection curves of beams with different layer orientations (series 1); dry specimens: a) v.u.; b) w.u.; c) u.w. and wet specimens; d) v.u.; e) w.u.; f) u.w.

Rys. 3. Zależność naprężenie zginające – ugięcie belek o różnej orientacji warstw (seria 1); próbki w stanie suchym: a) v.u.; b) w.u.; c) u.w. oraz próbki w stanie wilgotnym: d) v.u.; e) w.u.; f) u.w.

The obtained results were characterized by a large scatter, regardless of the layer orientation. All beams were damaged by a single crack, which developed near the center of the span (with some eccentricity, indicating the presence of weaker points in the structure). In the case of beams with a layer perpendicular to the load, macroscopic observations did not reveal damage to the contact zone, but in the case of u.w. orientation, it was noticed that the crack path direction had a horizontal shift at the layer interface.

In series 2, beams without a notch and with similar specimens dimensions were tested, but printed with a different single layer geometry of height $h_1 = 10$ and 15 mm, respectively. The piston displacement was controlled during loading, maintaining its speed at 0.015 mm/min to a force of 400 N, and then it was reduced to 0.003 mm/min. Individual curves for dry beams are shown in Figure 4, and the average bending strength values were as follows: $f_r = 5.59$ MPa at $h_1 = 10$ mm and $f_r = 4.82$ MPa at $h_1 = 15$ mm. In the case of damp beams, the average strength obtained was: $f_r = 3.85$ MPa and $f_r = 3.55$ MPa, respectively at $h_1 = 10$ and 15 mm. Increasing the thickness of a single layer by 50% resulted in a reduction of the average flexural strength by 8% in the case of damp specimens and 14% in the case of dry specimens. The obtained results indicate that the thickness of a single layer has an impact on the results, while maintaining unchanged mixture and printing parameters.

Otrzymane wyniki charakteryzowały się dużym rozrzutem, niezależnie od orientacji warstw. Wszystkie belki uległy zniszczeniu przez pojedynczą rysę, która rozwijała się w pobliżu środka rozpiętości (z pewnym mimośrodem, wskazującym na obecność słabszych punktów w strukturze). W przypadku belek z warstwą prostopadłą do obciążenia, obserwacje makroskopowe nie wykazały zniszczenia strefy kontaktu, ale w przypadku orientacji u.w. zauważono, że rysa miała poziome przesunięcie na łączeniu warstw.

W serii 2 zginano belki bez nacięcia, o zgodnych wymiarach całkowitych, ale wydrukowane ze zróżnicowanej geometrycznie pojedynczej warstwy, której wysokość wynosiła odpowiednio $h_1 = 10$ i 15 mm. Sterowano przemieszczeniem tłoka, utrzymując jego prędkość na poziomie 0,015 mm/min do siły 400 N, a następnie została ona zredukowana do 0,003 mm/min. Poszczególne wykresy dotyczące belek suchych pokazano na rysunku 4, a średnie wartości wytrzymałości na zginanie przedstawiały się następująco: $f_r = 5,59$ MPa przy $h_1 = 10$ mm oraz $f_r = 4,82$ MPa przy $h_1 = 15$ mm. W przypadku belek w stanie wilgotnym uzyskano średnią wytrzymałość: $f_r = 3,85$ MPa i $f_r = 3,55$ MPa odpowiednio przy $h_1 = 10$ i 15 mm. Zwiększenie grubości pojedynczej warstwy o 50% spowodowało redukcję średniej wytrzymałości na zginanie na poziomie 8% w przypadku wilgotnych oraz 14% – suchych próbek. Otrzymane wyniki wskazują, że grubość pojedynczej warstwy ma wpływ na otrzymane wyniki, przy zachowaniu niezmiennych parametrów mieszanki i druku.

In series 3 (Figure 5), the size effect was analyzed, i.e. the influence of the tested specimen size on its nominal flexural strength and brittleness. In all beams from series 3, a notch was made (the height of the notch was 0.1D). In this way, the crack was forced to develop in the middle of the beam's span and the observation of the size effect of type 2 with an energetic background was possible [17 – 18]. Three-point bending tests were performed, controlling the piston displacement process at a speed of 0.3 mm/min, and then the crack mouth opening displacement growth rate of 0.05%/min (using a crack gauge), which allowed load tracking during the softening phase. Comparison of the force - deflection curves slopes in the softening phase provides qualitative information on the brittleness of the beam (when the curve drops more steeply after reaching the maximum, the beam is more brittle). Controlling the load with crack mouth opening displacement gauge enables stable measurement even in the event of the snap-back phenomenon (a type of instability caused by reversing the deflection/displacement with increasing deformation). Only dry beams with v.u.

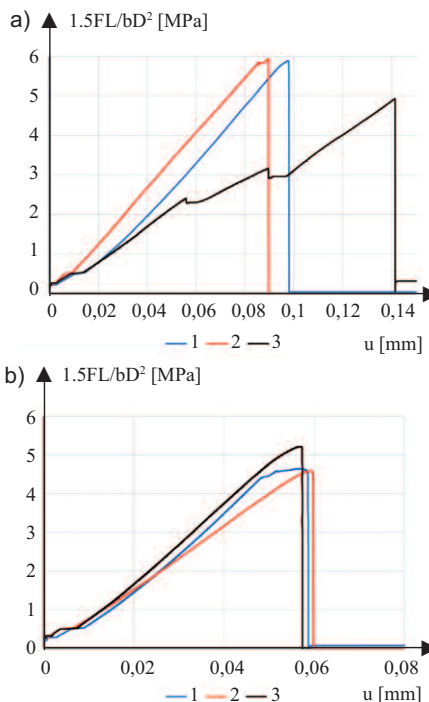


Fig. 4. Flexural stress – deflection curves for beams with a different layer geometry (series 2, dry beams); a) $h_1 = 10$ mm; b) $h_1 = 15$ mm

Rys. 4. Zależność naprężenie zginające – ugięcie belek o różnej geometrii warstwy (seria 2, belki suche): a) $h_1 = 10$ mm; b) $h_1 = 15$ mm

W serii 3 (rysunek 5) analizowano efekt skali, czyli wpływ wielkości badanej próbki na jej wytrzymałość nominalną na zginanie oraz kruchość. We wszystkich belkach z serii 3 wykonano karb (wysokość nacięcia wynosiła 0,1D). Wymuszono w ten sposób rozwój rysy w środku rozpiętości belki oraz umożliwiono obserwację efektu skali typu 2 o podłożu energetycznym [17 – 18]. Wykonano testy 3-punktowego zginania, kontrolując proces przemieszczeniem tłoka z prędkością 0,3 mm/min, a następnie przyrostem rozwarości rysy 0,05%/min (przy użyciu szczeliniomierza), co umożliwiło rejestrację przebiegu siły w fazie osłabienia. Porównanie nachylenia wykresów siły w funkcji ugięcia w fazie osłabienia dostarcza jakościowej informacji na temat kruchości belki (gdy krzywa po osiągnięciu maksimum opada bardziej stromo, to belka jest bardziej krucha). Sterowanie obciążeniem z kontrolą rozwarcia rysy umożliwia stabilny pomiar nawet w przypadku wystąpienia zjawiska typu snap-back (rodzaj niestabilności wywołany cofaniem ugięcia/przemieszczeń przy zwiększającej się deformacji). Przebadano tylko belki suche o orientacji warstw v.u. Na podsta-

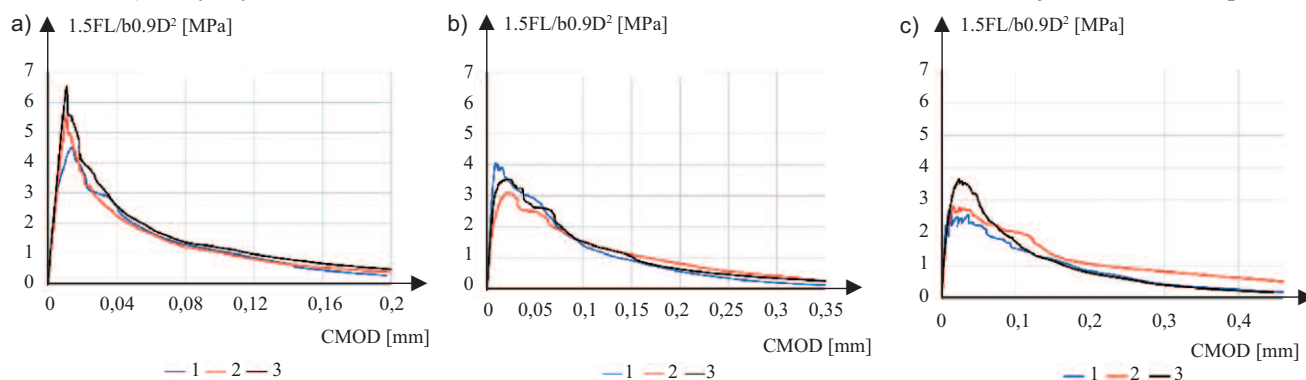


Fig. 5. Flexural stress – crack mouth opening displacement curves of geometrically similar beams of different sizes (series 3): a) small beams $D = 40$ mm; b) medium beams $D = 80$ mm; c) large beams $D = 120$ mm

Rys. 5. Zależność naprężenie zginające – rozwarcie rysy belek geometrycznie podobnych o różnej wielkości (seria 3): a) belki małe $D = 40$ mm; b) belki średnie $D = 80$ mm; c) belki duże $D = 120$ mm

layer orientation were tested. Based on the obtained failure forces, the following (average) flexural strengths were determined: $f_r = 5.53$ MPa, $f_r = 3.57$ MPa and $f_r = 3.06$ MPa for small ($D = 40$ mm), medium ($D = 80$ mm) and large ($D = 120$ mm) beams, respectively. The large beam was on average 45% weaker than the small beam. The reduction in strength with increasing beam dimensions points to a strong size effect in printed beams, primarily due to the material's brittleness, and potentially amplified by phenomena in the contact zones between layers. The average results obtained

wie zarejestrowanych sił niszczących określono następujące (średnie) wytrzymałości na zginanie: $f_r = 5,53$ MPa, $f_r = 3,57$ MPa oraz $f_r = 3,06$ MPa w przypadku belki małej ($D = 40$ mm), średniej ($D = 80$ mm) i dużej ($D = 120$ mm). Belka duża była średnio o 45% słabsza od belki małej. Redukcja wytrzymałości przy zwiększeniu wymiarów belki wskazuje na bardzo silny efekt skali w belkach drukowanych, co wynika przede wszystkim z kruchości materiału, ale może być dodatkowo spotęgowana zjawiskami zachodzącymi w strefie kontaktu między warstwami. Uzyskane średnie wy-

were compared with the analytical Size Effect Law (SEL) of type 2 (Figure 6) according to Bažant [19]:

$$\sigma(D) = \frac{\sigma_0}{\sqrt{1 + \frac{D}{D_0}}} \quad [2]$$

where:

σ_0 and D_0 – are unknown parameters determined using the least squares method.

The parameter D_0 is interpreted as the characteristic dimension of the specimen at which the asymptotes intersect, limiting the nominal strength determined by the theory of plasticity and linear-elastic fracture mechanics. Based on experimental data, the parameter $D_0 = 3.02$ mm was estimated, which corresponds to three times the diameter of the aggregate used (1 mm) and indicates a very high brittleness of the material.

Finally, measurements of the compressive strength of printed cubes were performed with different layer orientations, and the results were as follows (average value + standard deviation): $f_c = 30.4 \pm 5.8$ MPa for v.u., $f_c = 23.2 \pm 4.4$ MPa for w.u. and $f_c = 17.9 \pm 4.1$ MPa for u.w. The measured average compressive strength clearly depends on the arrangement of the layers relative to the load, due to the presence of contact zones between them. In terms of strength, the v.u. arrangement is the most favorable for compression.

Summary and conclusions

Based on the presented results of experimental tests performed on multiple concrete beams and cubes, manufactured with 3D additive printing technology, valuable conclusions were formulated and further research directions were indicated.

The flexural strength and compressive strength depend on the orientation of the printed sample's layers with respect to the loading direction. This phenomenon is very strong due to the presence of contact zones between individual layers. In the case of bending, the most favorable layer orientation is w.u., the average flexural strength of which was more than twice as high as that of the least favorable u.w. orientation. In the compression test, the highest strength was obtained in the case of v.u. orientation, which was 70% higher than the weakest w.u. orientation. Another factor strongly influencing the obtained results was the moisture content of the sample. **The average flexural strength and brittleness decreased significantly when the samples were damp. The geometry of a single layer also affected the obtained results.** Comparing the two analyzed cases, the thinner layer was more advantageous, despite the fact that it had more contact zones.

niki porównano z analitycznym prawem efektu skali typu 2 (rysunek 6) wg Bażanta [19]:

$$\sigma(D) = \frac{\sigma_0}{\sqrt{1 + \frac{D}{D_0}}} \quad [2]$$

gdzie:

σ_0 i D_0 – nieznanne parametry wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów.

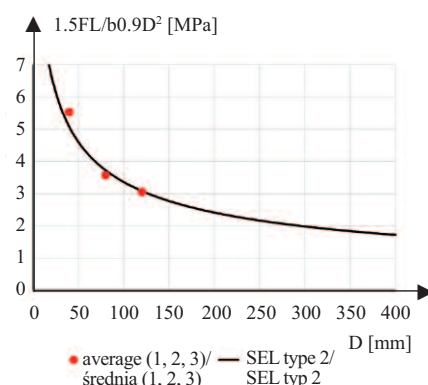


Fig. 6. Predicted effect of beam size on its flexural strength according to Bažant's size effect law of type 2

Rys. 6. Prognozowany wpływ wielkości belki na jej wytrzymałość na zginanie wg prawa efektu skali typu 2 wg Bażanta

$f_c = 23.2 \pm 4.4$ MPa w przypadku w.u. i $f_c = 17.9 \pm 4.1$ MPa w przypadku u.w. Pomierzona średnia wytrzymałość na ściskanie wyraźnie zależy od układu warstw względem obciążenia, ze względu na obecność stref kontaktu między nimi. Pod względem wytrzymałości najkorzystniejszy przy ścisaniu jest układ v.u.

Parametr D_0 jest interpretowany jako charakterystyczny wymiar próbki, przy której przecinają się asymptoty ograniczające wytrzymałość nominalną, określoną teorią plastyczności i liniowo-sprężystej mechaniki pęknięcia. Na podstawie danych eksperymentalnych oszacowano parametr $D_0 = 3.02$ mm, co odpowiada trzykrotności zastosowanej średnicy kruszywa (1 mm) i świadczy o bardzo dużej kruchości materiału.

Na koniec wykonano pomiary wytrzymałości na ściskanie drukowanych kostek przy różnej orientacji warstw, a wyniki przedstawiały się następująco (wartość średnia $\pm$ odchylenie standardowe):

$f_c = 30.4 \pm 5.8$ MPa w przypadku v.u.,

$f_c = 23.2 \pm 4.4$ MPa w przypadku w.u. i $f_c = 17.9 \pm 4.1$ MPa

w przypadku u.w. Pomierzona średnia wytrzymałość na ściskanie wyraźnie zależy od układu warstw względem obciążenia, ze względu na obecność stref kontaktu między nimi. Pod względem wytrzymałości najkorzystniejszy przy ścisaniu jest układ v.u.

Podsumowanie i wnioski

Na podstawie zaprezentowanych wyników badań eksperymentalnych, wykonanych na wielu belkach i kostkach betonowych, wytworzonych przyrostową technologią druku 3D, sformułowano wnioski i wskazano dalsze kierunki badań.

Wytrzymałość na zginanie oraz wytrzymałość na ściskanie zależą od orientacji warstw drukowanej próbki względem kierunku jej obciążenia. Zjawisko to jest bardzo silne ze względu na obecność stref kontaktu między poszczególnymi warstwami. W przypadku zginania, najkorzystniejszy układ warstw to w.u., którego średnia wytrzymałość na zginanie była ponaddwukrotnie większa niż najniekorzystniejszego układu u.w. W próbie ściskania największą wytrzymałość otrzymano w przypadku orientacji v.u., która była o 70% większa od najsłabszej orientacji w.u. Kolejnym czynnikiem bardzo silnie wpływającym na otrzymane wyniki była wilgotność próbki. **Średnia wytrzymałość na zginanie oraz kruchość wyraźnie malały, gdy próbki były wilgotne. Geometria pojedynczej warstwy również rzutowała na otrzymane wyniki.** Spośród dwóch analizowanych przypadków, korzystniejszy był ten, gdy warstwa była cieńsza, mimo tego, że oznaczało to więcej stref kontaktu. Przyczyną takie-

It might be caused by a weak bonding between thicker and wider layers, which indicates the need for further research. It was also shown that the phenomenon of the type 2 size effect in geometrically similar beams is another factor affecting the obtained results. Tripling the characteristic dimensions of the beam caused a 45% reduction in the average nominal strength of the beam.

Experimental studies on printed concrete beams will be continued. Different single-layer geometries will be taken into account and the influence of the sample's moisture on the obtained results will be verified.

The research was supported by the National Science Centre, Poland, project No. 2023/07/X/ST8/01392.

Received: 30.07.2025

Revised: 04.09.2025

Published: 21.11.2025

go stanu rzeczy może być osłabione wiązanie między grubszymi i szerszymi warstwami, co wskazuje na potrzebę dalszych badań. Wykazano także, że zjawisko efektu skali typu 2 w belkach geometrycznie podobnych to kolejny czynnik warunkujący otrzymane wyniki. Trzykrotne zwiększenie charakterystycznych wymiarów belki wywołało zmniejszenie średniej wytrzymałości nominalnej belki o 45%.

Badania doświadczalne na drukowanych belkach betonowych będą kontynuowane. Uwzględnione zostaną inne geometrie pojedynczej warstwy oraz zweryfikowany zostanie wpływ poziomu wilgotności próbki na otrzymane wyniki.

Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego o nr 023/07/X/ST8/01392 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.

Artykuł wpłynął do redakcji: 30.07.2025 r.

Otrzymało poprawiony po recenzjach: 04.09.2025 r.

Opublikowano: 21.11.2025 r.

Literature

- [1] Kodama H. Automatic method for fabricating a three – dimensional plastic model with photo- hardening polymer Rev Sci Instrum. 1981, <https://doi.org/10.1063/1.1136492>.
- [2] Santosh KP, Salil D. Comprehensive Review of Additive Manufacturing (3D Printing): Processes, Applications and Future Potential, American Journal of Applied Sciences. 2019. DOI: 10.3844/ajassp.2019.244.272.
- [3] Helena D. Druk 3D w budownictwie. Napędy i sterowanie. 2020; 12: 41 – 47.
- [4] Bos FP, Wolfs RJM, Ahmed ZY, Salet TAM. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. Virtual and Physical Prototyping. 2016; <http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>.
- [5] De Schutter G, Lesage K, Mechtcherine V, Nerella VN, Habert G, Agustí-Juan I. Vision of 3D printing with concrete – Technical, economic and environmental potentials, Cement and Concrete Research. 2016; <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>.
- [6] Bazli M, Ashrafi H, Rajabipour A, Kutay C. 3D printing for remote housing: Benefits and challenges, Automation in Construction, vol. 148, art. no. 104772, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104772>.
- [7] Le TT, Austin SA, Lim S, Buswell RA, Gibb AGF, Thorpe T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. Materials and Structures. 2012, <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>.
- [8] Buswell RA, Leal de Silva WR, Jones SZ, Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research, Cement and Concrete Research. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>.
- [9] Riaz RD, Usman M, Ali A, Majid U, Faizan M, Malik UJ. Inclusive characterization of 3D printed concrete (3DPC) in additive manufacturing: A detailed review, Construction and Building Materials. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132229>.
- [10] Singh A, Liu Q, Xiao J, Lyu Q. Mechanical and macrostructural properties of 3D printed concrete dosed with steel fibers under different loading direction. Construction and Building Materials. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126616>.
- [11] Ding T, Xiao J, Zou S, Zhou X. Anisotropic behavior in bending of 3D printed concrete reinforced with fibers, Composite Structures. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112808>.
- [12] Zhou W, Zhang Y, Ma L, Li VC. Influence of printing parameters on 3D printing engineered cementitious composites (3DP-ECC), Cement and Concrete Composites. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104562>.
- [13] Huang X, Jang W, Song F, Zou J. Study on the mechanical properties of 3D printing concrete layers and the mechanism of influence of printing parameters. Construction and Building Materials. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127496>.
- [14] Hoffmann M, Skibicki S, Pankratow P, Zielinski A, Pajor M, Techman M. Automation in the Construction of a 3D-Printed Concrete Wall with the Use of a Lintel Gripper, Materials. 2020; doi: 10.3390/ma13081800.
- [15] Kaszyńska M, Skibicki S, Hoffman M. 3D Concrete Printing for Sustainable Construction, Energies. 2020. DOI: 10.3390/en13236351.
- [16] Freek B et al., RILEM TC 304-ADC ILS-mech Study Plan, Tum. 2023, <https://doi.org/10.14459/2023mp1705940>.
- [17] Korol E, Tejchman J, Mróz Z. FE investigations of the effect of fluctuating local tensile strength on coupled energetic–statistical size effect in concrete beams. Engineering Structures. 2015; <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.10.012>.
- [18] Korol E, Tejchman J, Mróz Z. Experimental and numerical assessment of size effect in geometrically similar slender concrete beams with basalt reinforcement. Engineering Structures. 2017; <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.011>.
- [19] Bažant ZP, Planas J. Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasi-Brittle Materials. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1998.