

**AMIN BAGHERZADEH AZAR¹⁾**

ORCID: 0000-0003-3962-7129

ALI SARI²⁾

ORCID: 0000-0002-6888-1276

FAILURE ANALYSIS OF MULTI-SPAN MASONRY ARCH BRIDGES USING COMBINATION OF POINT CLOUD DATA AND THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODELING

ANALIZA MECHANIZMÓW ZNISZCZENIA WIELOPRZĘSŁOWYCH MUROWANYCH MOSTÓW ŁUKOWYCH Z ZASTOSOWANIEM CHMURY DANYCH I MODELOWANIA NUMERYCZNEGO 3D

STRESZCZENIE. Zabytkowe konstrukcje, w tym historyczne mosty, stanowią dokument istnienia dawnych cywilizacji i są ważnym elementem dziedzictwa kulturowego. Należyta ochrona takich obiektów wymaga przygotowania ich dokumentacji fotogrametrycznej w 3D, określenia szczegółowych właściwości geometrycznych i materiałowych oraz przeprowadzenia analiz konstrukcyjnych z zastosowaniem odpowiednich technik modelowania. Celem pracy jest przedstawienie skutecznej, niezawodnej i szybkiej metody analizy historycznych mostów murowanych. Podejście to zostało zilustrowane na przykładzie zabytkowego murowanego mostu łukowego Halilviran i jego zachowania pod potencjalnymi obciążeniami. Do określenia geometrii mostu z wysoką dokładnością wykorzystano technikę naziemnego skaningu laserowego (TLS). Dane zostały zgromadzone w chmurze i na tej podstawie stworzono trójwymiarowy model mostu, wykorzystując oprogramowanie CAD. Przedstawiona analiza stanowi weryfikację możliwości wykorzystania technologii skaningu laserowego do inwentaryzacji podobnych obiektów historycznych. Dodatkową korzyścią przedstawionej metody jest jej wykorzystanie w odniesieniu do innych elementów infrastruktury transportowej, jak również wykorzystanie zastosowanych metod numerycznych do oceny zachowania i ewentualnych mechanizmów zniszczenia mostu pod wpływem oddziaływań sejsmicznych. Właściwości sejsmiczne mostu zostały zbadane techniką modelowania w skali makro z zastosowaniem metody elementów skończonych. Następnie przeprowadzono nieliniowe analizy dynamiczne celem wskazania najbardziej narażonych obszarów mostu. Wyniki, przedstawione jako wykresy konturowe obrazujące naprężenia i maksymalne przemieszczenia, pozwalają na kompleksową analizę odpowiedzi całego obiektu na wpływy sejsmiczne. Przedstawiona metoda może być postrzegana jako wszechstronny zestaw narzędzi do oceny odpowiedzi i ewentualnych mechanizmów zniszczenia historycznych obiektów pod wpływem oddziaływań sejsmicznych.

SŁOWA KLUCZOWE: model MES, most łukowy murowany, nieliniowa analiza dynamiczna, oddziaływania sejsmiczne, przemieszczenia poprzeczne (poza płaszczyznę), ściana czołowa.

ABSTRACT. Historical structures, including historical bridges, are part of cultural heritage, conveying the traces and characteristic features of past civilizations. To protect historical structures, it is necessary to prepare their 3D photogrammetric documentation, determine detailed geometric and material properties and perform computer-aided structural analysis using appropriate modeling techniques. The aim of this study is to present an effective, reliable and fast multidisciplinary approach for the analysis of historical masonry bridges. The aforementioned approach was illustrated with an example of the historical Halilviran masonry arch bridge and its behavior under possible loadings. Terrestrial laser scanning (TLS) was used to determine the bridge geometry with high accuracy. Point cloud data obtained from TLS was simplified and a three-dimensional CAD-based solid model of the structure was created. The Halilviran Bridge case study summarized in this report was conducted to examine the technical feasibility of using laser scanning technologies for obtaining as-built records for similar historic bridges. A secondary objective was to identify other applications of this technology, notably for other transportation structures, and use numerical methods to assess the seismic behavior and failure model of the bridge. The seismic behavior of the bridge was examined using a finite-element-based macromodeling technique. Nonlinear dynamic analyses were carried out subsequently to identify the most susceptible regions of the bridge. Interpretation of the results, presented in the form of contour plots illustrating tensile damage and maximum displacements, offered a comprehensive depiction of the seismic response across the entire bridge. The methodology employed in this investigation can be viewed as a robust framework for evaluating the seismic response and potential failure of historical structures.

DOI: 10.7409/rabdim.024.014

KEYWORDS: finite-element model, masonry arch bridge, nonlinear dynamic analysis, seismic performance, spandrel wall, transverse (out-of-plane) response.

¹⁾ Istanbul Technical University, Institute of Earthquake Engineering and Disaster Management, 34469, Maslak, Istanbul, Turkey; azar19@itu.edu.tr (✉)

²⁾ Istanbul Technical University, Faculty of Civil Engineering, 34469, Maslak, Istanbul, Turkey; asari@itu.edu.tr

1. WSTĘP

Możliwe uszkodzenia elementów infrastruktury mogą powodować znaczne pośrednie i bezpośrednie koszty ekonomiczne i społeczne. Zachodzi więc potrzeba dokładnej oceny możliwości użytkowania zabytkowych obiektów murowanych oraz pozyskania szczegółowych danych, które pozwoliłyby na zarządzanie obiektami i planowanie prac utrzymaniowych. W ostatnich latach opracowano różnorodne techniki prognozowania pracy łukowych mostów murowanych. Ze względu na złożone zachowanie materiału i konstrukcji, do analizy potrzebny jest model uproszczony, ale zachowujący podstawowe cechy analizowanej konstrukcji. Nieodzowna jest weryfikacja nośności łukowych mostów murowanych w przypadku obciążeń sejsmicznych i określenie niezbędnych zabiegów wzmacniających konstrukcję. Badania prowadzone na obiektach uszkodzonych w wyniku trzęsień ziemi wykazały, że głównym czynnikiem zwiększającym wrażliwość konstrukcji jest pojawianie się lokalnych mechanizmów zniszczenia, zwłaszcza wynikających z przemieszczeń poza płaszczyznę elementów w skali mikro. Rozwój współczesnych metod konstrukcyjnych sprawił, że wykorzystanie wyników pomiarów wykonanych metodami tradycyjnymi nie są wystarczające do stworzenia dokładnego modelu konstrukcji. Istnieje więc potrzeba opracowania metod wszechstronnej analizy, opartej na wynikach obliczeń modelu numerycznego, które pozwoliłoby na zobrazowanie rzeczywistej pracy tych skomplikowanych zabytkowych mostów poddanych rzeczywistym obciążeniom oraz skuteczną identyfikację najbardziej narażonych elementów.

Ocenie podatności zabytkowych mostów murowanych na oddziaływania sejsmiczne poświęcone były liczne badania; zaproponowano różnorodne metodologie z zastosowaniem złożonych narzędzi numerycznych, pozwalające na zrozumienie mechanizmów zniszczenia [1], projektowanie wzmocnień, generowanie odwzorowań 3D obiektów i analizowanie odpowiedzi mostów łukowych na obciążenia przy pomocy metody elementów skończonych (MES). Co więcej, nieliniowa analiza dynamiczna pozwala na wszechstronne badanie pracy konstrukcji, w tym ocenę redystrybucji sił, analizę w zakresie odkształceń plastycznych, zmęczenia, mechanizmów zniszczenia i innych ważnych aspektów. Fairfield et al. w [2] przeprowadzili serię doświadczeń na modelowych łukach półkolistych i segmentowych wypełnionych suchym,

1. INTRODUCTION

Potential failure of infrastructure may generate significant direct and indirect costs to both the economy and society. Hence, there is an immediate need for accurate evaluation of the performance of historical masonry infrastructures and acquisition of precise data to guide maintenance and asset management decisions. Various techniques have been devised in recent years to forecast the behavior of masonry arch bridges. Due to the complexity of the material's behavior and the structural framework's resistance, a simplified yet efficient structural model is essential. Consequently, it is crucial to validate the load-bearing capacity of masonry arch bridges against seismic forces and determine the required reinforcement measures. Post-earthquake failure investigations have revealed that a primary factor contributing to the vulnerability of these structures is the occurrence of local failure modes, primarily resulting from the behavior of out-of-plane microelements. However, advancements in construction methods have rendered traditional experimental findings insufficient for developing accurate models. Therefore, there is a need to propose a comprehensive numerical approach capable of capturing the true structural response of these intricate historic bridges to lateral loads and effectively identify the most fragile components.

Extensive research has been dedicated to the seismic assessment of historic masonry structures, with various methodologies proposed, utilizing sophisticated numerical tools to comprehend failure mechanisms [1], design reinforcement systems, generate 3D structural representations and analyze the load response of filled arch bridges using finite element method (FEM). Furthermore, nonlinear dynamic analysis (NDA) serves as a comprehensive approach to structural behavior investigation, encompassing the assessment of force redistribution, ductility, damage, collapse mechanisms and other relevant information. Fairfield et al. [2] conducted a series of experiments on semicircular and segmental model arches, with infill composed of uniformly graded dry sand and supported by two glass walls. Analysis of the findings indicated that the collapse load increased proportionally to the depth of the infill. In a separate study, Melbourne et al. [3] performed a full-scale model test on a 6-m-span masonry arch bridge in the TRRL laboratory to explore the impact of spandrel walls and backfill material. The results of the test revealed that failure was attributed to a four-joint mechanism linked to

równomiernie uziarnionym piaskiem. Analizy wyników wykazały, że wielkość obciążenia powodującego zniszczenie rosło proporcjonalnie do głębokości zasyпки. W innej pracy Melbourne et al. [3] przeprowadzili pełnoskalowe badania doświadczalne na modelowym łuku murowanym o rozpiętości 6 m. Analiza dotyczyła wpływu materiałów użytych na ścianę czołową i zasypkę wypełniającą pachy łuku między ścianami. Wyniki wskazywały, że zniszczenie następowało w wyniku mechanizmu czteroprzegubowego, powiązanego z utratą spójności na spoinach pionowych i podziałem sklepienia na pomniejsze pierścienie, przy czym materiał zasypowy znacznie ograniczał ich deformacje. Wnioski płynące z takich badań podkreślają złożoność analiz mostów łukowych murowanych i wskazują na potrzebę opracowania zaawansowanych modeli numerycznych uwzględniających nieliniowość geometryczną. Royle et al. w [4] opisali prowadzone badania nad wpływem materiału zasypowego i rodzaju ściany czołowej na nośność mostów. Ich badania obejmowały 24 mosty łukowe o różnych rozpiętościach. Badania wykazały, że obecność ściany czołowej poprawia ogólną wytrzymałość łuku kolebkowego. W innej pracy Begimgil [5] zbadał wpływ właściwości ścian czołowych na most murowany z rozpiętością łuku 1,25 m. Ugięcia mierzono na całej szerokości łuku, a wyższe wartości stwierdzono wokół jego środka. Podobne wyniki ogłosili Boothby et al. [6] w swojej pełnoskalowej analizie mostów pod obciążeniami użytkowymi. Fanning et al. [7] przeprowadzili badania polowe na trzech istniejących mostach łukowych murowanych, aby określić rzeczywiste właściwości materiałów. Brencich et al. [8] przeprowadzili ocenę mostu Tanaro we Włoszech – wzniesionej w 1866 r. budowli złożonej z 18 przęseł murowanych. Badanie poświęcone było określeniu współczynników tłumienia i częstotliwości drgań własnych mostu podczas użytkowania i na różnych etapach prac rozbiórkowych. Milani et al. [9] wykorzystali MES do statycznej analizy nieliniowej mostów łukowych murowanych uwzględniając model 3D. Sevim et al. [10] przeprowadzili liniową analizę sejsmiczną dwóch zabytkowych mostów łukowych murowanych z zastosowaniem analizy modalnej. Pelà et al. [11] ocenili podatność sejsmiczną mostu murowanego z łukiem o trzech promieniach krzywizny, korzystając z analizy odpowiedzi w dziedzinie czasu i analizy pushover. Elif et al. [12] zbadali wpływ grubości łuku na nośność mostów łukowych murowanych i oszacowali odpowiedź konkretnej konstrukcji murowanej na oddziaływania sejs-

ring separation, with the backfill material significantly restricting arch ring deformation. Insights gained from such investigations underscore the intricate nature of evaluating masonry arch bridges, necessitating the development of sophisticated numerical analysis models that include geometric nonlinearity. Royle et al. [4] conducted a study on the impact of backfill materials and spandrel walls on the structural strength of bridges. Their research encompassed 24 arch bridges with varying spans. The findings revealed that the presence of spandrel walls contributed to enhancing the overall strength of the barrel arch. In a separate investigation, Begimgil [5] examined the influence of restraining spandrel walls on a masonry bridge with a span of 1.25 meters. Deflection measurements were taken across the entire width of the arch, indicating higher deflections around the center. Similar findings were reported by Boothby et al. [6] in their analysis of full-size bridges under operational loads. Fanning et al. [7] conducted field tests on three existing masonry arch bridges to determine appropriate material properties. Brencich et al. [8] evaluated the Tanaro Bridge in Italy, a structure comprising 18 masonry spans constructed in 1866. The study focused on determining the natural frequencies and damping ratios of the bridge during operation and various stages of demolition. Milani et al. [9] utilized finite element analysis to investigate the static nonlinear behavior of masonry arch bridges in 3D. Sevim et al. [10] conducted a study on the linear seismic analysis of two historical masonry arch bridges using modal analysis. Pelà et al. [11] explored the seismic evaluation of a triple curvature masonry bridge, assessing its seismic capacity through time history and pushover analysis. Elif et al. [12] examined the influence of arch thickness on the load-bearing behavior of masonry arch bridges and evaluated the seismic response of a specific masonry bridge by generating artificial acceleration records based on the seismic characteristics of the region.

This paper provides a detailed examination of the results obtained from advanced numerical analyses carried out on detailed three-dimensional finite element models. The methodology can be succinctly divided into three main stages. Initially, a precise three-dimensional finite element discretization of the bridge is created. Subsequently, nonlinear dynamic analyses are performed, applying the concrete damage plasticity (CDP) model to the masonry and the Mohr-Coulomb model to the backfill. Finally, the results are interpreted at a macroelement level. The initial

smiczne, korzystając ze sztucznie wygenerowanych danych o przyspieszeniach, odwzorowujących charakterystykę sejsmiczną regionu.

W niniejszej pracy szczegółowo omówiono wyniki uzyskane z zaawansowanych analiz numerycznych przeprowadzonych na trójwymiarowych modelach MES. Metodę można skrótowo podzielić na trzy główne etapy. Najpierw należy przeprowadzić dyskretyzację badanego obiektu w 3D. Następnie przeprowadza się nieliniowe analizy dynamiczne, stosując do betonu model plastyczny CDP (ang. *concrete damage plasticity*), zaś do materiału zasypowego – model Mohra-Coulomba. Ostatecznie dokonuje się interpretacji wyników w skali makro. Na etapie modelowania należy dążyć do wysokiej dokładności i uwzględnienia różnorodnych czynników, które istotnie wpływają na zachowanie konstrukcji podczas zniszczenia. Do czynników tych zaliczyć można stopień zazębiania między ścianami pionowymi, stan pach, właściwości i degradację materiałów murarskich, mimośrodę ciężaru własnego czy sztywność materiału zasypowego. Prowadzi się kompleksową inwentaryzację, skanowanie laserowe oraz badania nieniszczące celem zwiększenia dokładności analizy lokalnego i globalnego zachowania elementów, jak również liczbowego wyrażenia właściwości mechanicznych elementów murowanych. Po wstępnej fazie analiz statycznych liniowych i określeniu częstotliwości drgań własnych, wykorzystuje się model numeryczny do kompleksowych nieliniowych analiz dynamicznych. W obliczeniach tych stosowany jest wykres przyspieszeń, pozwalający na określenie wartości przyspieszenia podłoża skutkujących inicjacją konkretnych mechanizmów zniszczenia. Metodyka ta ułatwia identyfikację najbardziej narażonych i krytycznych komponentów obiektu.

Materiał wykazuje ograniczoną wytrzymałość na rozciąganie, właściwości cierne oraz tendencję do degradacji zarówno w rozciąganiu, jak i ściskaniu. Zastosowanie oprogramowania komercyjnego na standardowych stacjach roboczych z wiarygodnymi solverami dla metod jawnych pozwala na przeprowadzenie analizy w akceptowalnym czasie. Najważniejszy, ostatni etap polega na szczegółowej interpretacji wyników – wymaga ona odpowiedniej wiedzy teoretycznej i dobrego zrozumienia tematu. Przedstawione studium przypadku pokazuje, że drobiazgowa analiza skupiona na poszczególnych elementach w skali makro może dostarczyć cennych informacji o najbardziej narażonych segmentach wy-

modeling phase should aim for high accuracy and take into account various factors that significantly influence the structural behavior during failure. These factors include the degree of interlock between vertical walls, the state of spandrel walls, the degradation of masonry materials, the properties of masonry texture, the eccentricity of gravity loads, and the stiffness of the backfill. Comprehensive surveys, laser scanning and non-destructive testing are utilized to enhance the evaluation accuracy for the local and global behavior of the macroelements and to qualitatively assess the mechanical properties of the masonry. Following a setup phase involving linear static and natural frequency analyses, a numerical model is employed for thorough nonlinear dynamic calculations. These calculations incorporate the acceleration diagram to determine the ground acceleration required to initiate specific failure mechanisms. This methodology facilitates identification of the most critical and vulnerable components.

The material exhibits limited tensile strength, frictional characteristics, and a tendency to soften under damage in both tension and compression. Utilizing commercially available software on standard workstations with reliable explicit solvers allows for the analysis to be conducted within a reasonable timeframe. The critical final stage involves a detailed interpretation of the results, which requires good understanding of the subject and adequate theoretical knowledge. The presented case study illustrates that a thorough analysis, focusing on individual macroelements, can provide valuable insights into the most susceptible sections of structures that may need reinforcement. Additionally, by identifying the active failure mechanisms, this analysis can guide the effective implementation of devices to reduce seismic vulnerability.

2. CASE STUDY – CHARACTERISTICS

Anatolia is home to a wide array of architectural and historical landmarks, such as monuments and bridges. This region has historically been a crucial hub for caravans, with military routes controlled by the Roman and Byzantine empires long after the end of Persian rule. Many bridges date back to the Roman and Ottoman civilizations, showcasing unique characteristics in terms of design, construction methods and materials used. The specific features of these bridges were influenced by such factors as their location and historical context. Presently,

magających wzmocnienia. Ponadto, dzięki identyfikacji mechanizmów zniszczenia, analiza taka może wspomóc skuteczne zastosowanie urządzeń redukujących podatność konstrukcji na oddziaływania sejsmiczne.

2. STUDIUM PRZYPADKU – CHARAKTERYSTYKA MODELU

W Anatolii znajduje się bardzo wiele zabytków architektury – w tym historycznych mostów. Przez krainę tę wiodły historyczne szlaki kupieckie i wojskowe, zarówno pod panowaniem Persów, jaki i w czasach Cesarstwa Rzymskiego i Bizancjum. Wiele mostów stanowi zabytki cywilizacji osmańskiej i rzymskiej, dając pogląd na ówczesne charakterystyczne rozwiązania projektowe, konstrukcyjne i materiałowe. Na parametry poszczególnych mostów miały wpływ czynniki takie jak lokalizacja czy kontekst historyczny. Mosty łukowe kamienne są doceniane również współcześnie ze względu na dostępność materiału, zdolność do przenoszenia naprężeń oraz wydajne techniki konstrukcji. Na przykład most Halilviran, pierwotnie wzniesiony w czasach rzymskich, został zachowany dzięki wzmocnieniom i remontom wykonywanym w epoce Imperium Osmańskiego. Most Halilviran (Rys. 1) łączy brzegi Devegecidi Stream, jednego z dopływów Tygrysu, w punkcie znajdującym się ok. 20 km na północ od miasta Diyarbakir. Obecnie most zapewnia połączenie między wsiami Hantepe i Akpinar; wschodni kraniec mostu zwrócony jest w kierunku Akpinaru, zachodni zaś – w stronę Hantepe. Historycznie most znajdował się w pobliżu dróg Diyarbakir-Malatya oraz Diyarbakir-Harput; druga z nich nie jest już używana. Jest to obiekt murowany o siedmiu łukach; całkowita długość mostu wynosi 132 m, zaś szerokość pomostu – 5,10 m. Obecnie wysokość mostu nad poziomem gruntu. Rozpiętości łuków wahają się w zakresie od 5,95 m do 7,00 m. Pierwsze przęsło od strony wschodniej wyróżnia się charakterystycznym kształtem ostrołuku. Łuki drugi, trzeci i czwarty są wyraźnie większe od pozostałych. Patrząc od brzegów ku środkowi koryta rzeki, niweleta pomostu wznosi się o 2,20 m, po czym wypłaszcza się z nieznacznym nachyleniem. Płaskie odcinki pomostu sięgają około 15 m w kierunku wschodnim i 7 m w kierunku zachodnim.

stone arch bridges are commonly favored due to the availability of natural resources, their ability to withstand vertical stresses and their efficient construction techniques. For instance, the Halilviran Bridge, originally built during the Roman era, has been preserved through interventions and restoration efforts during the Ottoman period. The Halilviran bridge (Fig. 1) spans the Devegecidi Stream, a tributary of the Tigris, situated approximately 20 km north of Diyarbakir along the Diyarbakir-Egil Road. Presently, the bridge serves as a link between Hantepe and Akpinar villages, with its eastern end facing Akpinar and the western end facing Hantepe. Historically, the bridge was positioned in proximity of the Diyarbakir-Malatya and Diyarbakir-Harput roadways, although the former has since been abandoned. The bridge, a masonry construction with seven arches, spans a total length of 132 m and features a deck width of 5.10 m. The bridge currently stands at an elevation of approximately 8.50 m above ground level. The arch spans vary in width, ranging from 5.95 m to 7.00 m, with a distinctive pointed arch design observed in the easternmost arch. Notably, the second, third, and fourth arches are larger in size compared to the others. The bridge deck ascends by 2.20 meters on both sides as it approaches the riverbed, before leveling out with a slight incline. Following this transition, the deck continues straight for approximately 15 meters to the east and 7 meters to the west.

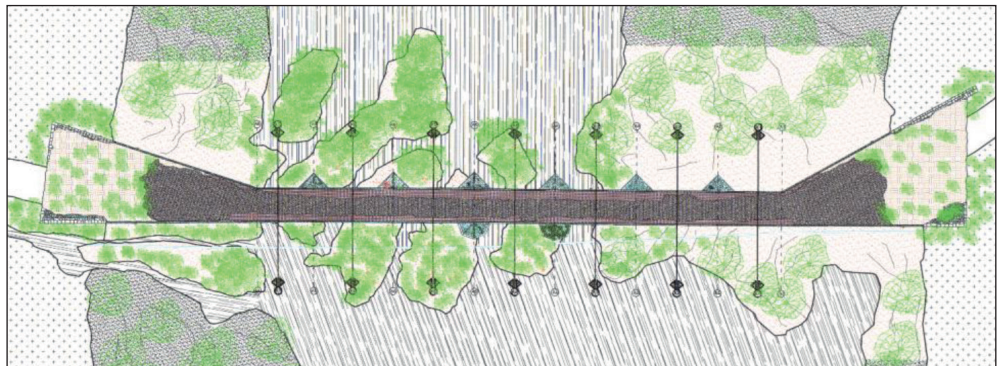


Fig. 1. Location of the Halilviran Bridge [13]

Rys. 1. Lokalizacja mostu Halilviran [13]

3. SKANING LASEROWY 3D I PRZETWARZANIE DANYCH

Zabytkowe konstrukcje, w tym historyczne mosty, stanowią ważny element dziedzictwa kulturowego. Należy ochrona takich obiektów wymaga przygotowania ich dokumentacji fotogrametrycznej w 3D, określenia szczegółowych parametrów geometrycznych i materiałowych oraz przeprowadzenia analiz konstrukcyjnych z zastosowaniem odpowiednich technik modelowania. Celem niniejszej pracy jest przedstawienie skutecznego, niezawodnego i szybkiego podejścia multidyscyplinarnego do analizy historycznych mostów murowanych, ze szczególnym naciskiem na mosty zlokalizowane w Turcji. W kolejnych rozdziałach przedstawione zostaną szczegółowe opisy i rysunki wybranego mostu. Uzyskaną chmurę danych pomiarowych uproszczono, generując model przestrzenny bryły mostu w oprogramowaniu CAD. Stanowił on podstawę modelu makro zastosowanego w analizach konstrukcyjnych. Po homogenizacji materiału niesprężyste zachowanie konstrukcji charakteryzowano w postaci modelu zniszczenia konstrukcji w zakresie plastycznym CDP (ang. *concrete damage plasticity*), co pozwoliło na dokładną i wiarygodną analizę pracy konstrukcji. Skanowanie laserowe zostało przeprowadzone przez 9. Dyрекcję Regionalną tureckiej Generalnej Dyrekcji Autostrad (KGM) oraz specjalistyczną firmę prywatną. Z zastosowaniem skanera laserowego FARO przeprowadzono 25-35 skanowań z różnych perspektyw. Na Rys. 2 i 3 przedstawiono oświetlenie i zastosowanie skanera laserowego podczas inwentaryzacji zabytkowego mostu Halilviran.

Na cały proces składało się wykonanie skanów i przetwarzanie danych. W różnych punktach mostu umieszczono markery referencyjne, które miały wspomóc wzajemne dopasowanie danych z poszczególnych skanowań. Za pomocą skanera laserowego FARO LS 3D zarejestrowano obrazy wszystkich widocznych powierzchni mostu. Każdy skan trwał 15-20 minut i był zapisywany jako plik w pamięci komputera. Wskazane jest wykorzystanie komputera dysponującego dostateczną mocą obliczeniową i pamięcią RAM do przetworzenia dużej ilości danych generowanych podczas skanowania. Po zakończeniu wszystkich skanów z różnych perspektyw pliki zostały połączone w oprogramowaniu FARO Scene. Program ten pozwala na identyfikację i zastosowanie umieszczonych wcześniej markerów do łączenia skanów, jak również

3. THREE-DIMENSIONAL LASER SCANNING AND DATA PROCESSING

Historical structures, such as bridges, are significant components of cultural heritage that preserve the characteristics and remnants of past civilizations. To protect historical structures, it is necessary to prepare their 3D photogrammetric documentation, determine detailed geometric and material properties and perform computer-aided structural analysis using appropriate modeling techniques. This research aims to introduce an efficient, dependable and rapid multidisciplinary methodology for analyzing historical masonry bridges, with a focus on bridges located in Turkey. Detailed descriptions, background information and images of the selected bridge are provided in subsequent sections. The acquired point cloud data was simplified to generate a three-dimensional CAD-based solid model of the bridge, serving as the foundation for the macromodel used in structural analysis. The concrete damage plasticity (CDP) material model was employed to characterize the inelastic behavior of the homogenized structure, enabling an accurate and reliable analysis of the structural performance of the historical bridge. Laser scanning activities were carried out by the 9th Regional Directorate of the Turkish General Directorate of Highways and a private firm specialized in laser scanning technologies, utilizing a FARO laser scanner to perform approximately 25-35 scans of the bridge from various perspectives. Figs 2 and 3 illustrate the lighting and utilization of a FARO laser scanner in inspecting the historical Halilviran Bridge.

The entire scanning process consisted of scans and subsequent data processing. Markers were placed at various locations on the bridge to aid alignment of individual laser scans. A FARO LS 3D laser scanner was employed to capture all visible surfaces from different viewpoints inside and outside the bridge. Each scan lasted approximately 15-20 minutes and was saved as a file on a computer. It is advisable to utilize a computer with sufficient processing power and RAM to manage the large amount of data points generated during scanning. Upon completing the scanning of all visible sections of the bridge, the software files were interconnected using the FARO Scene software. This software enables identification and utilization of pre-placed markers to merge individual scans, as well as removal of unwanted elements, such as passing vehicles or background foliage, through filtering

usuwanie niepożądanych elementów, takich jak pojazdy czy roślinność, poprzez filtrowanie. Procesy łączenia są powtarzane, aż wszystkie skany zostaną zespolone w całościowy obraz obiektu.

techniques. The scan linking process is repeated until all scans are integrated into a comprehensive representation of the entire bridge.

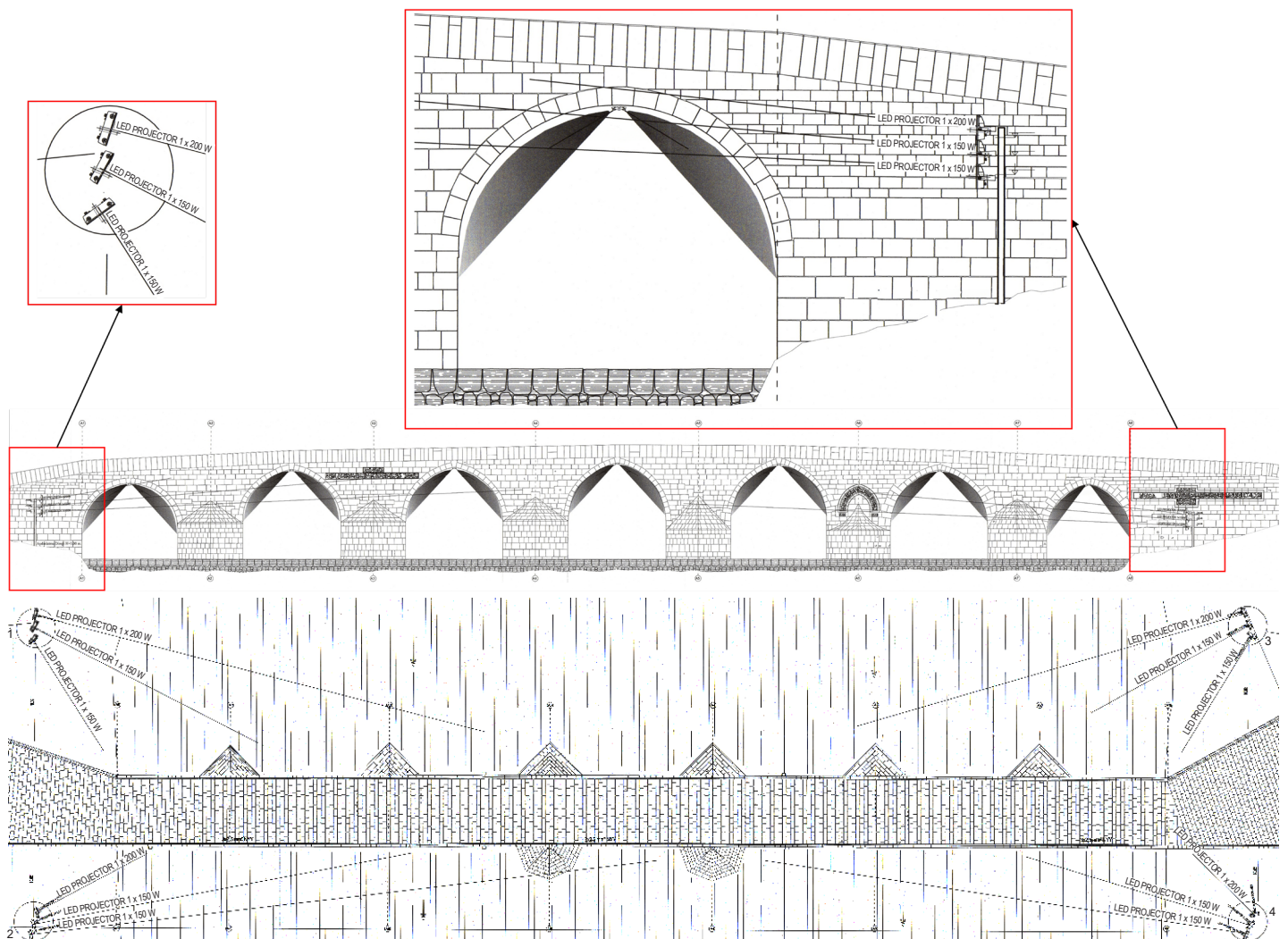


Fig. 2. Lighting of the Halilviran Bridge [13]

Rys. 2. Oświetlenie mostu Halilviran [13]



Fig. 3. 2D (a) and 3D (b) photographs of the Halilviran Bridge captured by laser scanning [13]
 Rys. 3. Obrazy 2D (a) i 3D (b) mostu Halilviran uzyskane techniką skaningu laserowego [13]

Otrzymana po połączeniu skanów chmura punktów może być wyeksportowana celem zobrazowania widocznych powierzchni i rzeczywistych wymiarów obiektu. Ten zestaw danych może być później zaimportowany do programu AutoCAD poprzez specjalny dodatek, pozwalający użytkownikom na stosowanie plików z chmurami punktów w formatach niewspieranych przez program. Taki dodatek zapewnia również specjalistyczne narzędzia do modelowania, zaprojektowane z myślą o bezpośrednim wykorzystaniu chmury danych w środowisku AutoCAD. Wybrane grupy danych można później wykorzystać do tworzenia różnorodnych przekrojów, poprawiając w ten sposób widoczność konkretnych elementów obiektu i służące do tworzenia modeli płaskich i przestrzennych.

Niniejsze badania poświęcone były analizie zabytkowego mostu murowanego Halilviran w Turcji. Dzięki szczegółowym badaniom archiwalnym i licznym inwentaryzacji terenowym pozyskano cenne dane wejściowe. Na Rys. 4 przedstawiono różne widoki i przekroje mostu Halilviran.

When all the individual scans have been combined, the resultant point cloud can be exported to illustrate the visible characteristics and actual measurements of the structure. This dataset is subsequently imported into AutoCAD software via a dedicated add-in, allowing users to use point cloud files that are not inherently supported by AutoCAD. Additionally, such an add-in provides specialized modeling tools designed for direct manipulation of point cloud data within the AutoCAD environment. Afterwards, the point cloud can be divided into various cross sections to improve the visibility of specific bridge elements, thereby aiding the creation of both two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) models.

This research is focused on the examination of the historical Halilviran masonry bridge located in Turkey. Owing to extensive archival research and numerous on-site surveys, valuable initial insights have been acquired. Fig. 4 showcases the layout, cross sections and critical geometric dimensions of the Halilviran Bridge.

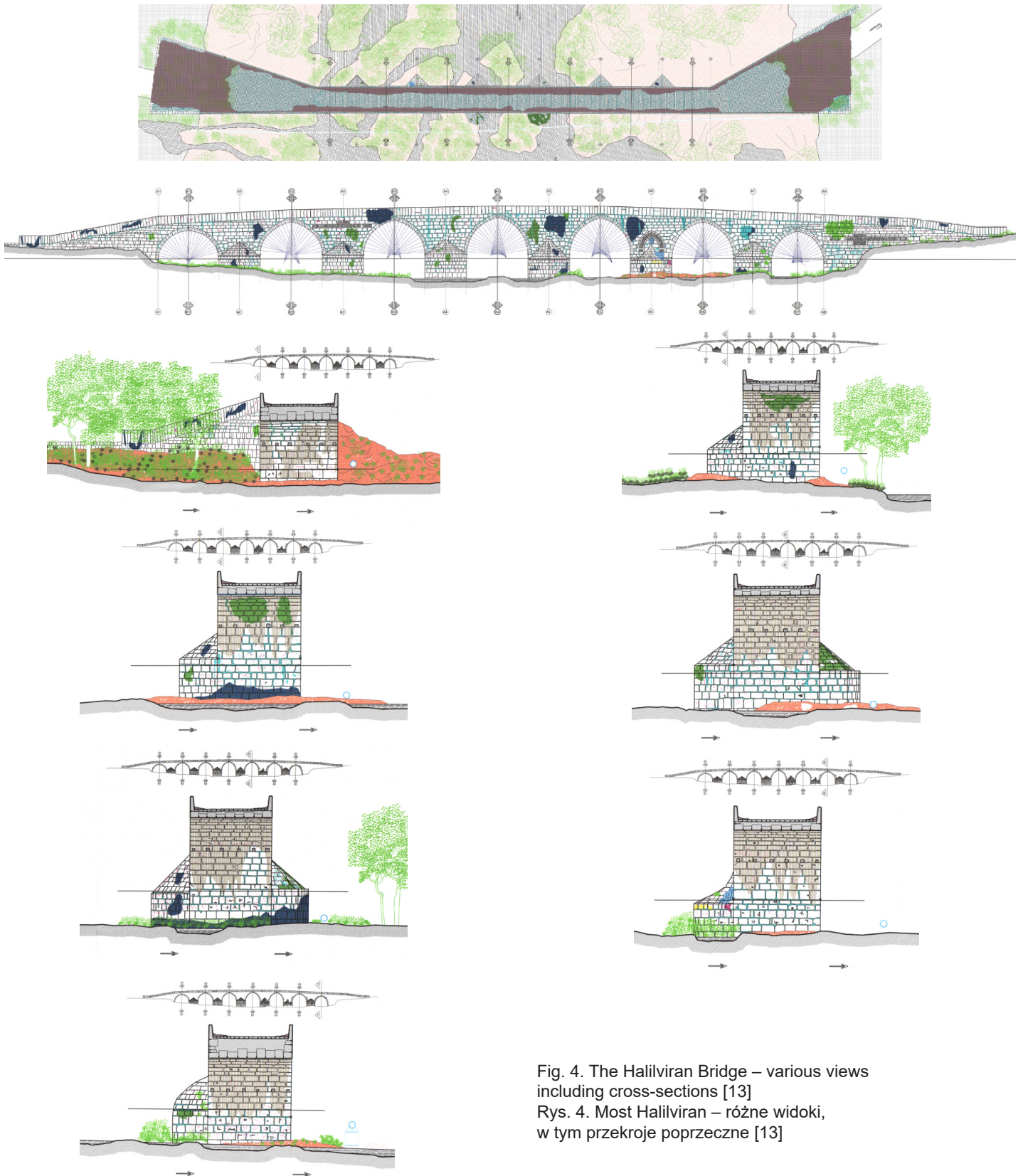
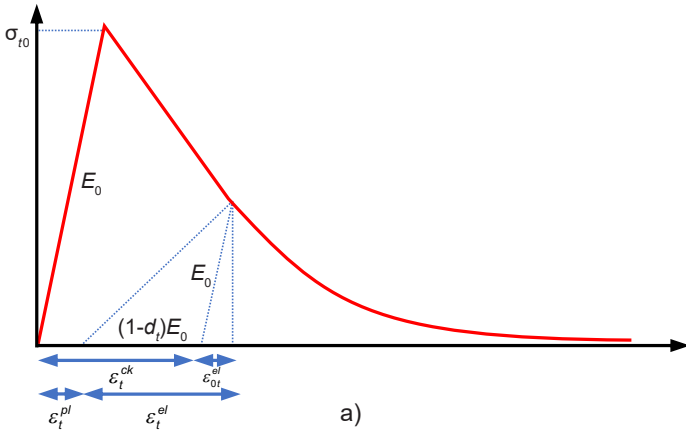


Fig. 4. The Halilviran Bridge – various views including cross-sections [13]
 Rys. 4. Most Halilviran – różne widoki, w tym przekroje poprzeczne [13]

4. WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁOWE

4.1. MODEL PLASTYCZNY BETONU CDP

Model zniszczenia plastycznego betonu (CDP) stanowi wiarygodne przybliżenie dokładnego odwzorowania dwóch rodzajów zniszczenia materiału, tj. pęknięcia przy rozciąganiu i miażdżenia przy ściskaniu. Model ten skutecznie uwzględnia efekt stopniowej degradacji materiału pod obciążeniami cyklicznymi. Rys. 5 przedstawia typowe zachowanie elementu murowanego przy rozciąganiu i ściskaniu.



4. MATERIAL PROPERTIES

4.1. THE CDP MATERIAL MODEL

The concrete damage plasticity (CDP) model presents a commendable approach for accurately representing two common types of failure, namely tensile cracking and compressive crushing. This modeling technique efficiently integrates the deterioration of materials under cyclic stress conditions. Fig. 5 illustrates the inherent behavior of masonry when subjected to both tensile and compressive loads.

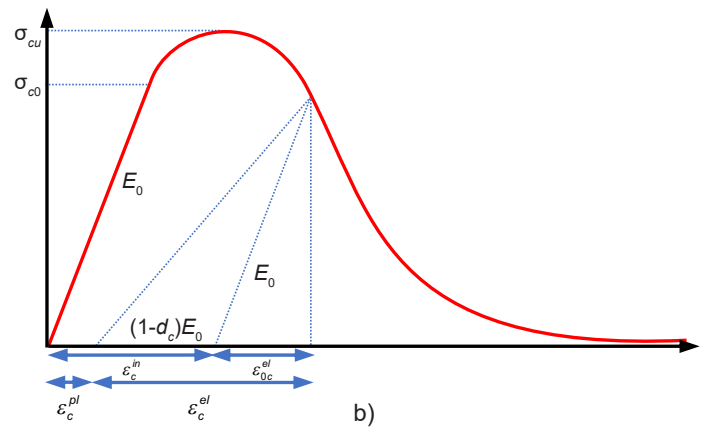


Fig. 5. Representation of the constitutive behavior of masonry in: a) tension, b) compression

Rys. 5. Charakterystyki modelu konstytutywnego elementów murowanych przy: a) rozciąganiu, b) ściskaniu

Gdy materiał jest poddany rozciąganiu, wykazuje zachowanie liniowo sprężyste do momentu, gdy naprężenia osiągną wartość graniczną σ_{t0} . Wówczas w materiale pojawiają się mikropęknięcia. Po osiągnięciu maksymalnej wartości naprężenia następuje osłabienie materiału, jak pokazano na Rys. 5a. Deformacje materiału przy ściskaniu pokazano na Rys. 5b. Początkowo, przy obciążaniu do granicznej wartości naprężenia σ_{c0} , występują deformacje liniowo sprężyste, a następnie, do wartości naprężenia σ_{cu} deformacje nieliniowo sprężyste. Po osiągnięciu maksymalnej wartości naprężenia σ_{cu} , następuje osłabienie materiału, jak pokazano na Rys. 5b.

Charakterystyki modelu zniszczenia plastycznego betonu można zapisać następująco:

$$\sigma_t = (1 - d_t) \cdot D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon_t^{el}), \quad (1)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) \cdot D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon_c^{el}), \quad (2)$$

gdzie indeksy t i c oznaczają odpowiednio rozciąganie i ściskanie oraz:

Within the context of tensile behavior, the material exhibits a linearly elastic response until the stress reaches the limit value of σ_{t0} . Microfracture is the result of material reaching its maximum stress. After reaching the maximum point, the material exhibits softening, as depicted in Fig. 5a. Material deformation under compression are shown in Fig. 5b. Linear compression appears until the limit σ_{c0} and nonlinear one up to the stress at its maximum value of σ_{cu} . Beyond the maximum σ_{cu} , the material exhibits softening, as shown in Fig. 5b.

The concrete damage plasticity model may be characterized in terms of stress and strain, as follows:

$$\sigma_t = (1 - d_t) \cdot D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon_t^{el}), \quad (1)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) \cdot D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon_c^{el}), \quad (2)$$

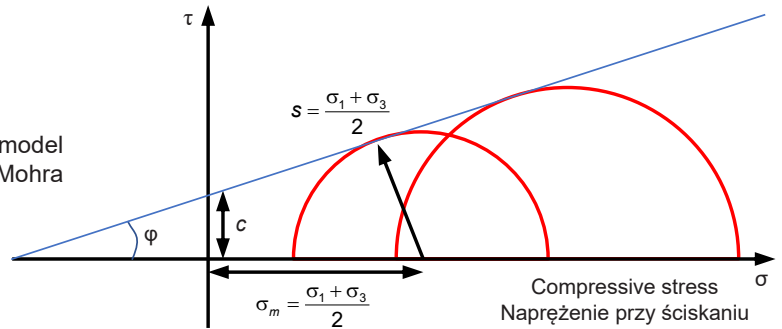
where subscript t stands for tension, c for compression and:

σ_t, σ_c – naprężenie przy rozciąganiu, ściskaniu,
 $\varepsilon_t^{el}, \varepsilon_c^{el}$ – odkształcenia trwałe odpowiednio przy rozciąganiu i ściskaniu, w zakresie odkształceń powodujących osłabienie materiału,
 d_t i d_c – zmienne odpowiadające degradacji (uszkodzeniu), odpowiednio przy rozciąganiu i ściskaniu,
 D_0^{el} – początkowy moduł sprężystości w stanie bez uszkodzeń (odpowiada modułowi E_0 na Rys. 5).

4.2. MODEL KONSTYTUTYWNY COULOMBA-MOHRA

Biorąc pod uwagę, że jako materiał zasypowy wypełniający most stosowano zazwyczaj grunt, niezwiązane elementy murarskie lub gruz, w niniejszym badaniu, dla zasyпки przyjęto model materiału Coulomba–Mohra. Kryterium zakłada, że w chwili ścięcia materiału ziarnistego zależność między naprężeniami stycznymi a normalnymi, w danym punkcie ośrodka, jest opisana zależnością liniową (Rys. 6).

Fig. 6. The Mohr–Coulomb material model
 Rys. 6. Model Coulomba–Mohra



W modelu tym naprężenie styczne τ może być wyrażone jako funkcja naprężenia normalnego σ , kohezji c oraz kąta tarcia wewnętrznego φ :

$$\tau = c + \sigma \tan(\varphi). \quad (3)$$

Model można wyrazić również za pomocą trzech niezmienników. Pierwszy jest tożsamy z naprężeniem hydrostatycznym:

$$p = -\frac{1}{3} \text{tr}(\sigma). \quad (4)$$

Drugi odpowiada naprężeniu równoważnemu wg Misesa:

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} (S \cdot S)}, \quad (5)$$

gdzie $S = \sigma + pI$ jest dewiatorem tensora naprężeń.

σ_t – tensile stress,
 σ_c – compressive stress,
 ε_t^{el} – plastic strain in tension
 ε_c^{el} – plastic strain in compression,
 d_t and d_c – variables that signify damage for tension and compression, respectively,
 D_0^{el} – undamaged initial elastic modulus (relates to E_0 in Fig. 5).

4.2. THE MOHR–COULOMB CONSTITUTIVE MODEL

Since the fill material commonly comprises soil, unbound masonry or rubble, the current study utilizes the Mohr-Coulomb material model to integrate the infill as granular material. The Mohr-Coulomb criterion states that the yield point of a material is determined by the linear correlation between the shear stress acting on any point in the material and the normal stress acting on the corresponding plane (Fig. 6).

In this model, shear stress τ can be characterized as a function of normal stress σ , cohesion c and angle of internal friction φ :

$$\tau = c + \sigma \tan(\varphi). \quad (3)$$

The M-C model may be stated by three stress invariants. The first relates to pressure mean stress:

$$p = -\frac{1}{3} \text{tr}(\sigma). \quad (4)$$

The second relates to Mises equivalent stress:

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} (S \cdot S)}, \quad (5)$$

where $S = \sigma + pI$ is the stress deviator.

Trzeci jest miarą naprężenia dewiatorowego R_{mc} :

$$R_{mc}(\theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{3}\cos\varphi} \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) + \frac{1}{3} \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \tan(\varphi). \quad (6)$$

5. METODA MODELOWANIA W SKALI MAKRO

W analizach zabytkowych mostów murowanych rozróżnia się dwa fundamentalne podejścia: modelowanie w skali mikro lub makro (Rys. 7). Przy modelowaniu w skali mikro materiał konstrukcyjny przenoszący obciążenia, taki jak kamień czy cegła, jest modelowany oddzielnie od zaprawy, która zapewnia połączenie elementów. Podejście to można dodatkowo podzielić na szczegółowe i uproszczone techniki. Modelowanie makro polega z kolei na traktowaniu konstrukcji jako całości złożonej z jednorodnego materiału, nie zaś z odrębnych elementów. Technika ta jest preferowana przy analizach MES dużych konstrukcji, wymaga ona bowiem mniejszej liczby węzłów i elementów niż modelowanie mikro. Modelowanie makro jest często wykorzystywane w analizach złożonych konstrukcji murowanych, takich jak mury, fundamenty, ściany czołowe, łuki i sklepienia. Metoda ta nie zapewnia szczegółowego wglądu w geometrię i propagację spękań czy dokładny mechanizm zniszczenia. Polega ona na homogenizacji (ujednoliceniu) materiału, w wyniku którego kamień/cegła i zaprawa są łączone w jeden materiał o ustalonych właściwościach. Konstrukcja murowana jest przedstawiana jako jednorodna i izotropowa, bez rozróżniania między jej poszczególnymi składnikami [14-16]. Stosując teorię dotyczącą materiałów kompozytowych, dokonuje się homogenizacji przy założeniu, że segment murowany jest jednorodny i izotropowy. W tym celu rozpatruje się regularny segment wycięty z muru, określa się jego parametry na podstawie proporcji między zaprawą a cegłami, po czym traktuje się go jako jednorodny materiał. Model zastosowany przez autorów w niniejszym artykule można zaklasyfikować jako model makro.

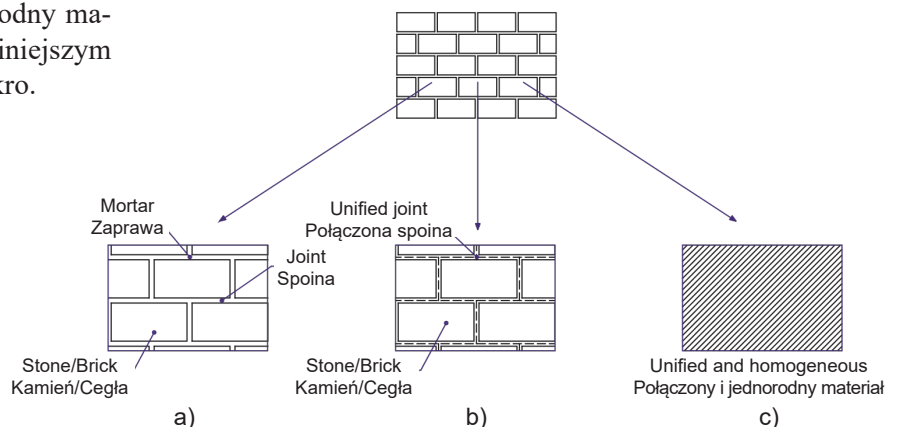
The third invariant relates to deviatoric stress R_{mc} :

$$R_{mc}(\theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{3}\cos\varphi} \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) + \frac{1}{3} \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \tan(\varphi). \quad (6)$$

5. MACROMODELING METHOD

In the analysis of historical masonry structures, two fundamental assumptions are considered: macromodeling and micromodeling (Fig. 7). In the micromodeling approach, the load-carrying structural material, such as stone or brick, is modeled separately from the mortar that provides the binding effect. This method is further categorized into detailed and simplified modeling techniques. On the other hand, macromodeling involves treating the structural materials as a single material entity rather than separate components. This modeling technique is favored for FEM analyses of large structures, as it requires less nodes and elements than micromodeling. Macromodeling is commonly employed in modeling complex masonry structures like walls, foundations, buttresses, arches and vaults. However, this method does not provide detailed insights into crack geometry, propagation and collapse behavior. It involves homogenizing the materials, where stone or brick and mortar are amalgamated into a single material with set properties. The masonry structure is represented as homogeneous isotropic, without distinguishing between its individual components [14-16]. Through the application of composite material theory, homogenization is achieved by assuming that the masonry unit possesses a homogeneous and isotropic material characteristic. This method involves considering a simple cell extracted from the masonry wall, where material parameters are determined based on the proportions of mortar and brick, treating them as a unified material. In this research, the authors regard the model as a macromodel.

Fig. 7. Approaches to modeling: a) micro, b) simplified micro, c) macro [17]
Rys. 7. Sposoby podejścia do modelowania: a) mikro, b) uproszczony model mikro, c) makro [17]



6. PRZYJĘTE MODELE: MES ORAZ MATERIAŁOWY

Autorzy przeprowadzili kompleksową analizę geometrii mostu, wykorzystując istniejącą dokumentację, inwentaryzacje terenowe i obszerne zbiory fotografii. Pozwoliło to na przygotowanie modeli przestrzennych MES mostu. Modele geometryczne były tworzone bezpośrednio w komercyjnym oprogramowaniu Abaqus, jak pokazano na Rys. 8.

6. FEM MODELS AND MATERIAL MODEL ADOPTED

The authors conducted a comprehensive geometric analysis of the bridge by utilizing existing documentation, on-site surveys and extensive photographic collections. This enabled the development of 3D finite element models of the bridge. The geometric models of the bridge were created directly in the commercial software Abaqus, as depicted in Fig. 8.

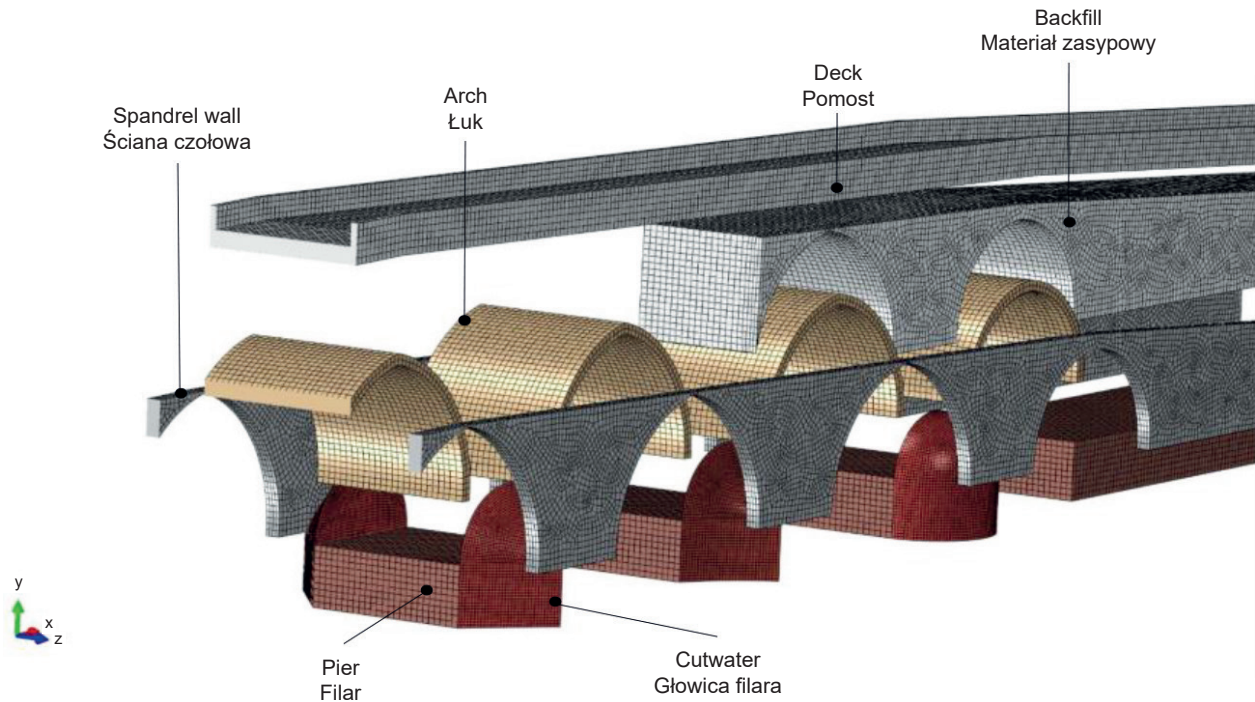


Fig. 8. Finite element model of the bridge with different components
Rys. 8. Model MES mostu z podziałem na różne części składowe

Model składa się z różnych części składowych konstrukcji, będących elementami w skali makro. Dyskretyzację w 3D przeprowadzono z zastosowaniem elementów C3D8R, czyli elementów 8-węzłowych ze zredukowanym całkowaniem. Dobór rozmiaru elementów miał na celu zapewnienie kompromisu między dokładnością a wydajnością obliczeniową nieliniowych analiz dynamicznych. W badaniu wszechstronnie przeanalizowano globalną i lokalną odpowiedź różnych elementów makro w obrębie obiektu. Niesprężyste zachowanie elementów murowanych symulowano w programie Abaqus za pomocą modelu CDP, uwzględniając zjawiska takie jak pękanie przy rozciąganiu, miażdżenie przy ściskaniu i degradację materiału pod wielokrotnymi obciążeniami. Aby dokładnie przewidzieć

The model consists of various structural components referred to as macroelements. The 3D discretization utilized C3D8R elements, which are 8-node reduced integration elements. The element size selection aimed to balance accurate results and computational efficiency for non-linear dynamic analyses. The study thoroughly examined the global and local responses of different macroelements within the structure. The concrete damage plasticity (CDP) model in Abaqus was employed to simulate the non-elastic behavior of masonry, capturing phenomena such as tensile cracking, compressive crushing and material degradation under cyclic loading. To accurately predict the bridge's response up to its collapse, it was essential to consider the interactions between key components

odpowiedź obiektu aż do momentu zniszczenia, konieczne było uwzględnienie interakcji między jego głównymi komponentami, takimi jak łuk murowany, ściana czołowa i zasyпка. Zdolność modelu mechanicznego do odwzorowania nieliniowości materiału murowanego znacząco wpływa na dokładność prognoz dla łukowych mostów murowanych. Wiarygodne odwzorowanie zachowania części składowych mostu, takich jak strop łuku czy ściana czołowa, jest kluczowe dla dokładnych prognoz odpowiedzi obiektu. W literaturze stosowano różne rodzaje kontaktu na styku kamień–kamień, zasyпка–ściana czołowa czy zasyпка–łuk. W przestrzennym modelu MES mostu uwzględniono interakcje między materiałem zasypowym, ścianami, łukami i filarami. Kontakt powierzchniowy rozpatrywano na stykach komponentów murowanych z innymi komponentami murowanymi i z materiałem zasypowym. Założono zerową odległość na styku, z „twardym” kontaktem w ramach oddziaływania normalnego do powierzchni styku. „Twardy” kontakt oznacza interakcję bez osłabienia, a zatem brak przenikania czy penetracji na powierzchni styku. W ramach oddziaływań stycznych do powierzchni założono współczynnik tarcia 0,6 [18-23]. Uśrednione mechaniczne parametry materiałowe dla styku elementów murowanych przyjęto na podstawie [24-35]. Szczegółowe parametry materiałowe przyjęte dla elementów murowanych i zasyпки podano w Tabl. 1-4.

Table 1. Plasticity parameters of the CDP model
Tablica 1. Parametry plastyczności modelu CDP

Parameter / Parametr	Value / Wartość
Dilation angle ψ [°] Kąt dylatacji	20
Eccentricity ϵ Mimośród potencjału plastycznego	0.1
f_{b0} / f_{c0}	1.16
K_c	0.667
Viscosity parameter Parametr wiskotyczny	0.01

Table 3. Input parameters for backfill material
Tablica 3. Dane wejściowe dla materiału zasypowego

ρ [kg/m³]	E [MPa]	ν [–]	c [MPa]	ϕ [°]
1900	500	0.2	0.05	35

such as the masonry arch, spandrel walls and backfill. The ability of the mechanical model to represent material nonlinearity in masonry significantly influences the accuracy of response predictions for masonry arch bridges. Therefore, an authentic representation of the behavior of bridge components like the arch barrel and spandrel wall is crucial for precise response predictions. Various interface contacts have been utilized in the literature to model stone–stone, backfill–spandrel and backfill–arch interactions. The 3D finite element models of the bridge incorporated interactions between the backfill, spandrel walls, arches, and piers, with surface-to-surface contact considered in masonry–masonry and masonry–backfill interactions. The contact is assumed to be zero thickness, with hard contact assigned for the normal behavior of surface-to-surface contact. It is posited that “Hard” contact denotes an interaction devoid of any softening, implying that no penetration of the surfaces can occur in the model, with a friction coefficient of 0.6 considered in the tangential behavior [18-23]. The average mechanical material characteristics for the interfaces and masonry units are sourced from [24-35]. The mechanical material properties for masonry and backfill sourced from the literature are detailed in Tables 1-4.

Table 2. Basic material properties
Tablica 2. Podstawowe parametry materiałowe

Part Część	Density Gęstość ρ [kg/m³]	Young’s modulus Moduł Younga E [MPa]	Poisson’s coefficient Współczynnik Poissona ν [–]
Pier / Filar	2200	3500	0.2
Cutwater Głowica filara	2200	2800	0.2
Arch / Łuk	2200	3360	0.2
Spandrel wall Ściana czołowa	1900	1500	0.2
Deck / Pomost	2000	1500	0.2

Table 4. Non-elastic material parameters
Tablica 4. Parametry zachowań niesprężystych materiału

Part / Część	f_t [MPa]	f_c [MPa]	G_f [MPa]
Pier / Filar	0.71	7.06	45
Arch / Łuk	0.84	8.4	54
Spandrel wall / Ściana czołowa	0.32	3.15	20.3

7. ANALIZA MODALNA

Na pracę mostów murowanych wpływa w istotnym stopniu wiele różnorodnych parametrów. Do najważniejszych czynników należą: całkowita długość mostu, liczba przęseł, maksymalna długość przęsła, wysokość konstrukcji, rodzaj zastosowanych łuków oraz właściwości materiałowe. Dokładne prognozowanie pracy konstrukcji wymaga zastosowania modelu MES. Aby poddać weryfikacji model MES opracowany dla danego obiektu murowanego, należy odnieść się do wyników badań doświadczalnych lub równań empirycznych. Bayraktar et al. [36] zastosowali w swoich badaniach metody statystyczne, które pozwoliły na ustalenie zależności między maksymalną rozpiętością łuku a częstotliwością pierwszej postaci drgań własnych dla ośmiu mostów murowanych. Zależność uzyskaną z tych analiz wyrażono równaniem:

$$y = -3,935 \ln(x) + 16,824. \quad (7)$$

Oznaczenia x i y wyrażają odpowiednio maksymalną rozpiętość łuku (w metrach) i częstotliwość pierwszej postaci drgań własnych (w hercach). Autorzy przyjmują, że równanie (7) jest odpowiednie do walidacji modelu analitycznego mostów murowanych. Biorąc pod uwagę minimalne rozbieżności między wartościami częstotliwości pierwszej postaci drgań uzyskanymi doświadczalnie i obliczonymi teoretycznie, autorzy uznają, że utworzony model MES odwzorowuje odpowiedź konstrukcji z dostateczną dokładnością.

Analiza współczynników udziału masy oraz kształtów drgań wskazuje, że pierwsza, trzecia i piąta postać drgań własnych mają istotny wpływ na zachowanie modelu. W Tabl. 5 pokazano rozkład pierwszych 10 postaci drgań własnych mostu Halilviran wraz z odpowiadającymi im współczynnikami udziału masy (PMR, ang. *participating mass ratio*) w kierunkach podłużnym i poprzecznym. Ponadto kształty najważniejszych postaci drgań zobrazowano wraz z odpowiadającymi im częstotliwościami na Rys. 9. Pierwsza postać ($f = 8,8076$ Hz, co odpowiada okresowi 0,11 sekund) związana jest z drganiami pomostu, a współczynnik udziału masy PMR w kierunku poprzecznym wynosi 24,02%. Trzecia postać ($f = 9,8325$ Hz, okres 10 sekund) dotyczy górnych części filarów i balustrad. PMR w kierunku poprzecznym wynosi 12,72%. Piąta postać ($f = 11,010$, $T = 0,09$ s) dotyczy zasypki i pomostu. Tutaj występuje najwyższa wartość współczynnika udziału masy PMR (35,4%) – w kierunku podłużnym.

7. MODAL ANALYSIS

Structural performance of masonry bridges is significantly affected by a variety of characteristics. Key factors include the bridge's overall length, number of spans, maximum span length, height, arch type and material properties. Accurate evaluation of structural behavior necessitates the use of finite element modeling. Validation of the initial finite element model, in case of masonry structures requires one to perform tests or use empirical equations. In a study conducted by Bayraktar et al. [36], statistical methods were employed to establish a quantitative relationship between the maximum arch span and the initial natural frequencies of eight masonry bridges. The relationship determined through the analysis of respective natural frequencies is given in equation:

$$y = -3.935 \ln(x) + 16.824. \quad (7)$$

The symbols x and y denote the maximum arch span (in meters) and the first natural frequency (in Hertz), respectively. Consequently, the authors propose that equation (7) is suitable for validating the analytical model of masonry bridges. Given the minimal discrepancy between the experimentally obtained and theoretically calculated initial frequency values, the authors conclude that the constructed finite element model accurately reflects the actual structural response.

The mass contribution ratio and the analysis of the mode motions indicate that the first, third and fifth modes significantly influence the behavior of the model. Table 5 shows the distribution of the initial 10 modes of the Halilviran Bridge with participating mass ratio (PMR) in both longitudinal and transverse directions. In addition, the deformed shapes of the primary modes are shown together with their respective frequencies in Fig. 9. The first mode ($f = 8.8076$ Hz, corresponding to a period of 0.11 seconds) involves the deck, with the transverse direction showing a PMR value of 24.02%. The third mode ($f = 9.8325$ Hz, period of 0.10 seconds) affects the upper part of the piers and the parapet walls. The PMR in the transverse direction is 12.72%. The fifth mode ($f = 11.010$, $T = 0.09$ s) concerns the filling and the deck of the bridge. It has the highest PMR (35.4%) in the longitudinal direction. The sixth vibration mode, with $f = 11.196$ Hz (a period of 0.08 seconds) concerns the parapet wall of the bridge. Its PMR (approx. 6.55%) is highest in the transverse direction.

Szosta postać drgań własnych, przy $f = 11,196$ Hz, dotyczy balustrad mostu. W jej przypadku współczynnik PMR (ok. 6,55%) jest najwyższy w kierunku poprzecznym.

Table 5. Numerical natural frequencies and ratios of the effective mass to the total mass in the three main directions

Tablica 5. Częstotliwości drgań własnych i stosunek masy efektywnej do masy całkowitej w trzech kierunkach głównych

Mode Postać	f [Hz]	$m_{\text{eff},x} / m_{\text{tot}}$ [%]	$m_{\text{eff},y} / m_{\text{tot}}$ [%]	$m_{\text{eff},z} / m_{\text{tot}}$ [%]
1	8.8076	0	0	24.02
2	9.3167	0	0	0.1
3	9.8325	0.1	0	12.7
4	10.470	0.4	0	0
5	11.010	35.4	0	0
6	11.196	0.1	0	6.55
7	12.067	0	0	0.4
8	12.943	0	0	0.2
9	13.092	0	0	4.60
10	14.078	0	0	0.1

8. ANALIZA NIELINIOWA

Na kolejnym etapie model poddawany jest analizom dynamicznym pod wpływem dwóch składowych poziomych ruchu podłoża. Równania nieliniowe rozwiązywano za pomocą metody Newtona-Raphsona z całkowaniem z krokiem czasowym 0,005 s. Tłumienie Rayleigha charakteryzuje rozpraszanie energii wynikające ze zjawisk nieuwzględnionych w związkach konstytutywnych. Wartości współczynnika tłumienia lepkiego dla konstrukcji murowanych ogólnie zawierają się w przedziale od 2% do 10%.

Przy obliczeniach z wykorzystaniem modelu zastosowano współczynnik tłumienia 3%, który określono na podstawie analizy częstotliwości pierwszej postaci drgań własnych oraz częstotliwości, przy której suma współczynników udziału masy przekracza 90%. W badaniu użyto danych o przyspieszeniach podłoża zarejestrowanych podczas trzęsienia ziemi w Düzce 17 sierpnia 1999 r. Na Rys. 10 przedstawiono przebieg dwóch składowych poziomych przyspieszenia podłoża, przy zarejestrowanej szczytowej wartości przyspieszenia PGA (ang. *peak ground acceleration*) wynoszącej 0,36 g w obu kierunkach.

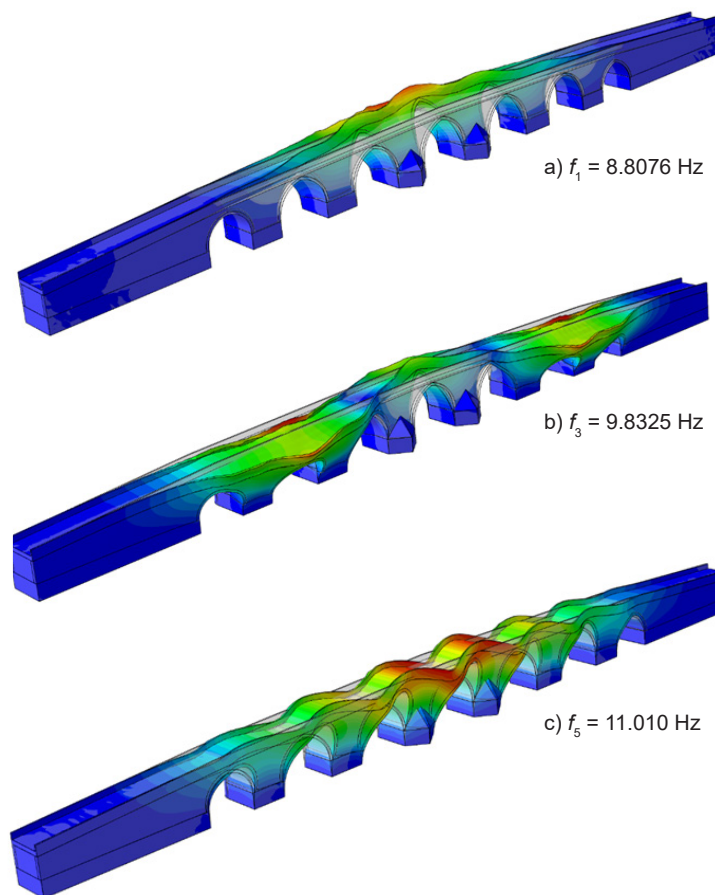


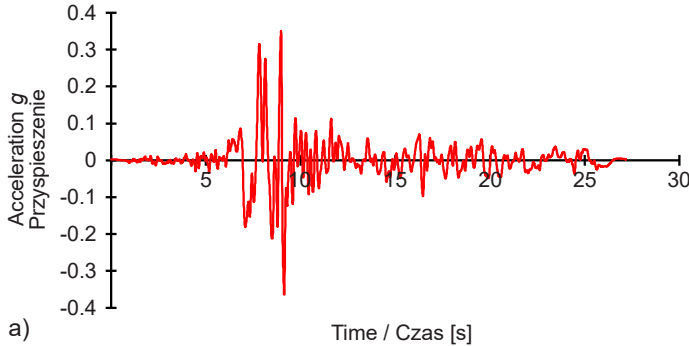
Fig. 9. Distribution of the most significant modes in the longitudinal and transverse directions
Rys. 9. Najbardziej istotne postacie drgań w kierunkach podłużnym i poprzecznym

8. NONLINEAR ANALYSES

In the following stage, the model undergoes dynamic analysis with two horizontal ground motion components. The nonlinear equilibrium equations are solved using the full Newton-Raphson method through a stepwise integration method with a time increment of 0.005 s. Rayleigh damping characterizes the energy dissipation arising from phenomena unaccounted for in the material's constitutive law. Viscous damping coefficients for masonry structures generally fall within the range of 2% to 10%.

In this research, the model is assigned a damping ratio of 3%, which is established through the analysis of the first natural frequency and the frequency at which the sum of participating mass ratios surpasses 90%. This study uses acceleration data that was recorded during the Düzce earthquake sequence on August 17, 1999. Fig. 10 depicts the time history of acceleration, specifically the two horizontal

Podjęto decyzję o ograniczeniu czasu trwania akceleroqramów do 5 sekund (pomiędzy 7. a 12. sekundą na wykresie) celem lepszego wykorzystania znacznych zasobów obliczeniowych potrzebnych do analiz.



components, with respect to the peak ground acceleration (PGA) of 0.36 g in the longitudinal and transverse directions.

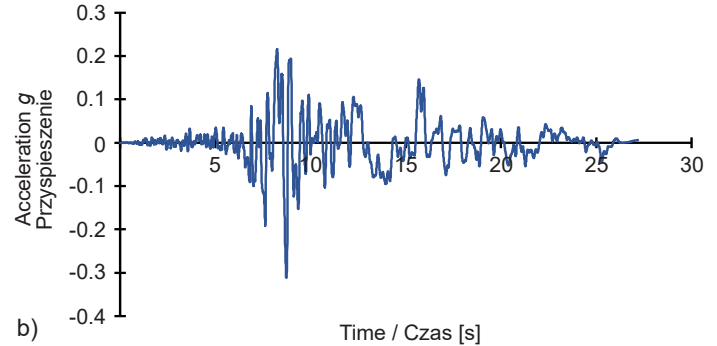


Fig. 10. Horizontal components of the real accelerograms used in the non-linear dynamic analyses: a) longitudinal direction, b) transverse direction

Rys. 10. Składowe poziome rzeczywistych akceleroqramów zastosowanych w nieliniowych analizach dynamicznych: a) kierunek podłużny, b) kierunek poprzeczny

9. WYNIKI

Ogólna ocena pracy mostu murowanego prowadzona jest poprzez analizę porównawczą wyników. Pierwsze porównanie dotyczy szacowanej ilości energii absorbowanej przez model. Równowaga energetyczna układu w warunkach aktywności sejsmicznej może być wyrażona przez równanie:

$$EI = W_{\xi} + W_p + W_e + W_k \quad (8)$$

gdzie:

EI – energia wprowadzona do układu przez trzęsienie ziemi,

W_{ξ} – energia rozproszona przez lepkość (efekty wiskotyczne),

W_p – energia histeretyczna, obejmująca plastyczność i uszkodzenia,

W_e – energia odkształcenia sprężystego,

W_k – energia kinetyczna.

Całkowita energia drgań sprężystych, oznaczona W_{ev} , jest połączeniem energii odkształcenia sprężystego W_e oraz energii sprężystej W_k . Równanie (8) można więc zapisać jako:

$$EI - W_{ev} = W_{\xi} + W_p \quad (9)$$

The decision was made to restrict the duration of the accelerograms to 5 seconds (between the 7th and 12th second of the graph) in order to manage the substantial computational resources needed for the analyses.

9. RESULTS

Evaluation of the overall performance of the masonry bridge is carried out through comparative analysis of the results. Initially, this comparison involves an assessment of the amount of energy absorbed by the model. The energy equilibrium of the system under seismic activity can be expressed by equation:

$$EI = W_{\xi} + W_p + W_e + W_k \quad (8)$$

where:

EI – energy input from the earthquake,

W_{ξ} – energy dissipated due to viscous effects,

W_p – hysteretic energy, encompassing plasticity and damage,

W_e – elastic-strain energy,

W_k – kinetic energy.

The overall elastic vibrational energy, represented by W_{ev} , is the combination of elastic strain energy W_e and kinetic energy W_k . Equation (8) can be reformulated in a different manner:

Całkowita energia absorbowana przez układ jest widoczna po prawej stronie równania (9). W ujęciu bardziej szczegółowym, na $W\xi$ składa się energia rozproszona przez efekty wiskotyczne, w tym część rozproszoną przez podłoże w „tłumikach” odwzorowujących posadowienie $W(\xi, s)$ oraz część przejętą przez konstrukcję przez tłumienie Rayleigha $W(\xi, r)$. Z kolei Wp odzwierciedla energię rozproszoną przez konstrukcję poprzez odkształcenia plastyczne i uszkodzenia. Obliczenie $W(\xi, s)$ wymaga całkowania współczynników tłumików oraz kwadratów prędkości na tłumikach w czasie. Aby zapewnić odtwarzalność wyników, zmienna EI oznacza w analizie zewnętrzną pracę. Ponadto $W\xi$ oznacza energię rozproszoną przez efekty wiskotyczne, zaś Wp oznacza sumę energii rozproszonej przez odkształcenia plastyczne o uszkodzenia. Zmienna We oznacza energię odkształcenia sprężystego, a Wk energię kinetyczną. W modelu o posadowieniu trwale połączonym z podłożem wielkość $W\xi$ jest tożsama z $W(\xi, r)$, w związku z brakiem tłumików na styku konstrukcja–grunt.

Na Rys. 11 przedstawiono zmienność omawianych energii w modelu. Głównym mechanizmem rozproszenia energii wprowadzonej do układu jest odkształcenie plastyczne. Zjawisko to powiązane z lokalnymi uszkodzeniami w ograniczonej liczbie elementów; potwierdziło to odpowiedniość wybranych parametrów modelu CDP. Badanie poświęcone jest efektom uszkodzeń wywołanych rozciąganiem i ściskaniem w materiałach murowanych, szczególnie w kontekście oceny oddziaływań sejsmicznych. Pękanie przy rozciąganiu i miażdżenie przy ściskaniu to dwie podstawowe formy uszkodzeń obserwowane w elementach murowanych; rozciąganie odgrywa tu istotną rolę, biorąc pod uwagę, że wytrzymałość na rozciąganie jest niższa niż wytrzymałość na ściskanie. Pęknięcia pod wpływem rozciągania następują w mostach, gdy spodziewane odkształcenia plastyczne i naprężenia główne (rozciągające) przekraczają określone wartości graniczne. Na Rys. 12 przedstawiono maksymalne wartości i wykresy konturowe równoważnych plastycznych odkształceń rozciągających w łukach murowanych pod wpływem silnych podłużnych i poprzecznych ruchów podłoża. Rozkład równoważnych plastycznych odkształceń rozciągających po 5 sekundach trwania trzęsienia ziemi wskazuje na skoncentrowane odkształcenia plastyczne w okolicach ściany łączącej łuki. Maksimum odkształceń plastycznych stwierdzono w łukach murowanych, z wyraźną koncentracją w dolnej części łuku.

$$EI - Wev = W\xi + Wp \quad (9)$$

The cumulative energy absorption in equation (9) is delineated on the right-hand side. Specifically, $W\xi$ comprises the dissipated energy from viscous effects, which includes the dissipation of soil through dashpots denoted by $W(\xi, s)$ and the portion attributed to the structure through Rayleigh damping $W(\xi, r)$. Conversely, Wp represents the energy dissipation by the structure through plasticity and damage. Computation of $W(\xi, s)$ involves the integration of dashpot coefficients and the square of velocities across the dashpots over time. To ensure reproducibility of results, the variable EI signifies the external work in the analysis. Additionally, $W\xi$ denotes the energy dissipated due to viscous effects, while Wp represents the combined energy dissipated by plastic deformation and damage. The variable We signifies the recoverable strain energy, and Wk represents the kinetic energy. In the base-fixed model, $W\xi$ and $W(\xi, r)$ coincide due to the absence of dashpots.

Fig. 11 illustrates the variations of the discussed energies within the model. The primary dissipation of input energy occurs due to plastic deformation. This phenomenon is attributed to the localized damage in a limited number of elements, thus validating the suitability of the selected CDP model parameters. The research examines the effects of tension- and compression-induced damage on masonry materials, specifically within the context of assessing seismic damage in masonry bridges. Tensile cracks and compressive crushing are the primary forms of damage observed in masonry materials, with tension playing a significant role due to the fact that tensile strength is lower than compressive strength. Tensile fractures in bridges occur when the anticipated plastic strains and principal stresses in tension exceed specified threshold values. Fig. 12 illustrates the maximum values and patterns of equivalent plastic tensile strains in masonry arches under the influence of strong longitudinal and transverse ground motions. The distribution of equivalent plastic tensile strain following 5 seconds of earthquake records indicates concentrated tensile plastic deformations around the bearing portion connecting the arches of the wall. The masonry arches display peak plastic tensile strains, with the strains predominantly concentrated in their lower interior sections.

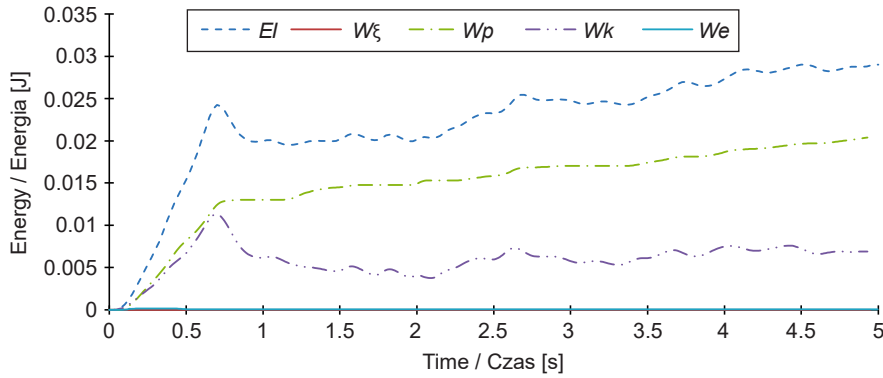


Fig. 11. Total input energy EI , energy dissipated by viscous effects W_{ξ} , hysteretic energy (energy dissipated in plastic deformation) W_p , kinetic energy W_k , and elastic-strain energy W_e
 Rys. 11. Całkowita wprowadzona energia EI , energia rozproszona przez efekty wiskotyczne W_{ξ} , energia hysteretyczna (energia wydysypowana przy deformacjach plastycznych) W_p , energia kinetyczna W_k oraz energia odkształcenia sprężystego W_e

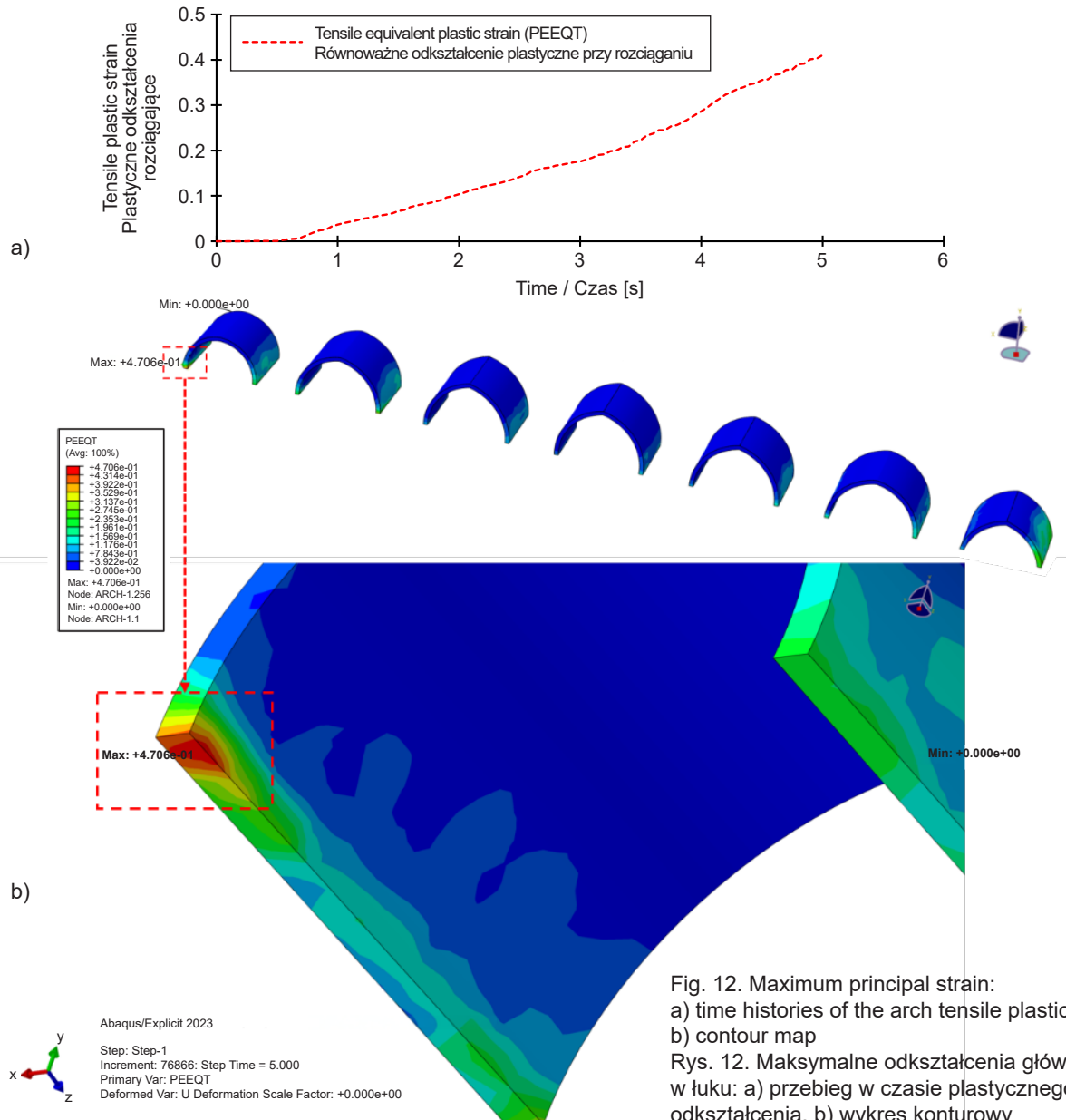


Fig. 12. Maximum principal strain:
 a) time histories of the arch tensile plastic strain,
 b) contour map

Rys. 12. Maksymalne odkształcenia główne w łuku: a) przebieg w czasie plastycznego odkształcenia, b) wykres konturowy

Na Rys. 13 pokazano dynamiczne przemieszczenia poziome górnej i dolnej krawędzi ściany czołowej mostu. Wykres ten uwidacznia znaczenie przemieszczeń poza płaszczyznowych w odpowiedzi mostu murowanego.

Fig. 13 depicts the dynamic horizontal displacements at the upper and lower extremities of the spandrel walls of the bridge. This graph highlights the importance of the structural reaction in masonry bridges that occurs out-of-plane.

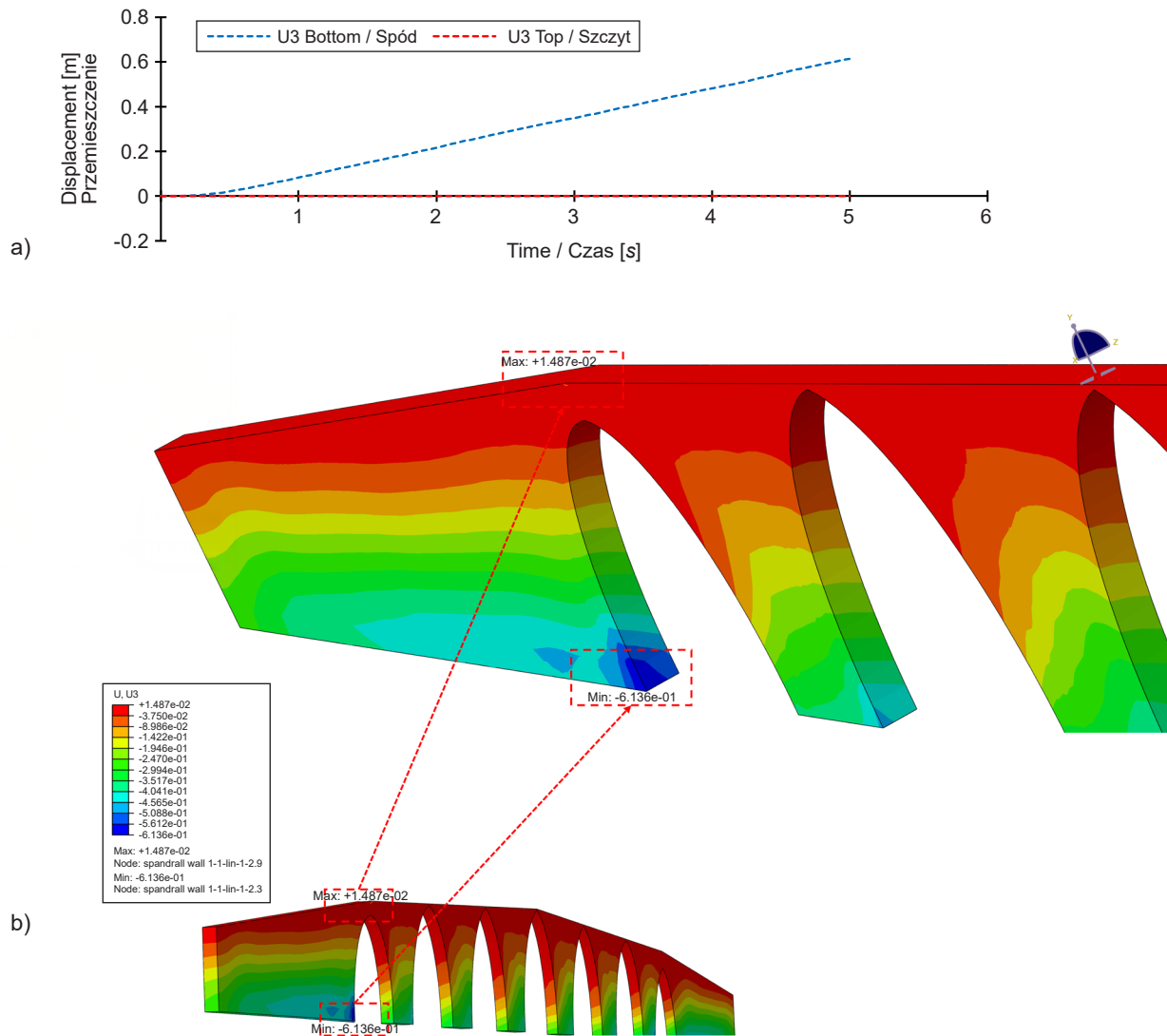


Fig. 13. Displacements in the transverse directions at the bottom and top of the spandrel wall: a) time histories, b) contour map
Rys. 13. Przemieszczenia poprzeczne na spodzie i szczycie ściany czołowej: a) przebieg w czasie, b) wykres konturowy

Pomiary służące oszacowaniu przemieszczeń poprzecznych ściany czołowej ujawniają pojawienie się odpowiedzi poza płaszczyzną ściany. Przemieszczenia podłużne odwzorowują jej pracę w płaszczyźnie. Stateczność ścian czołowych i ich właściwe połączenie ze stropami łuków

The measurements are conducted to evaluate the lateral displacements of the spandrel wall, which reveal the emergence of out-of-plane attributes within the wall. The longitudinal displacements of the spandrel wall are evaluated to determine its in-plane performance. The stability

należą do kluczowych czynników wpływających na różnorodne problemy występujące w mostach łukowych. Kolejne rysunki (Rys. 14, 15 i 16) pokazują, że segment murowany doznaje ekstremalnych wartości naprężeń pod wpływem znacznych ruchów sejsmicznych wzdłuż styku z łukiem.

of the spandrel walls and their interconnection with the arch barrel are pivotal factors impacting the diverse issues encountered in masonry arch bridges. Figs 14, 15 and 16 demonstrate that the masonry unit experiences maximum principal stresses when subjected to significant ground motion along the arch interface.

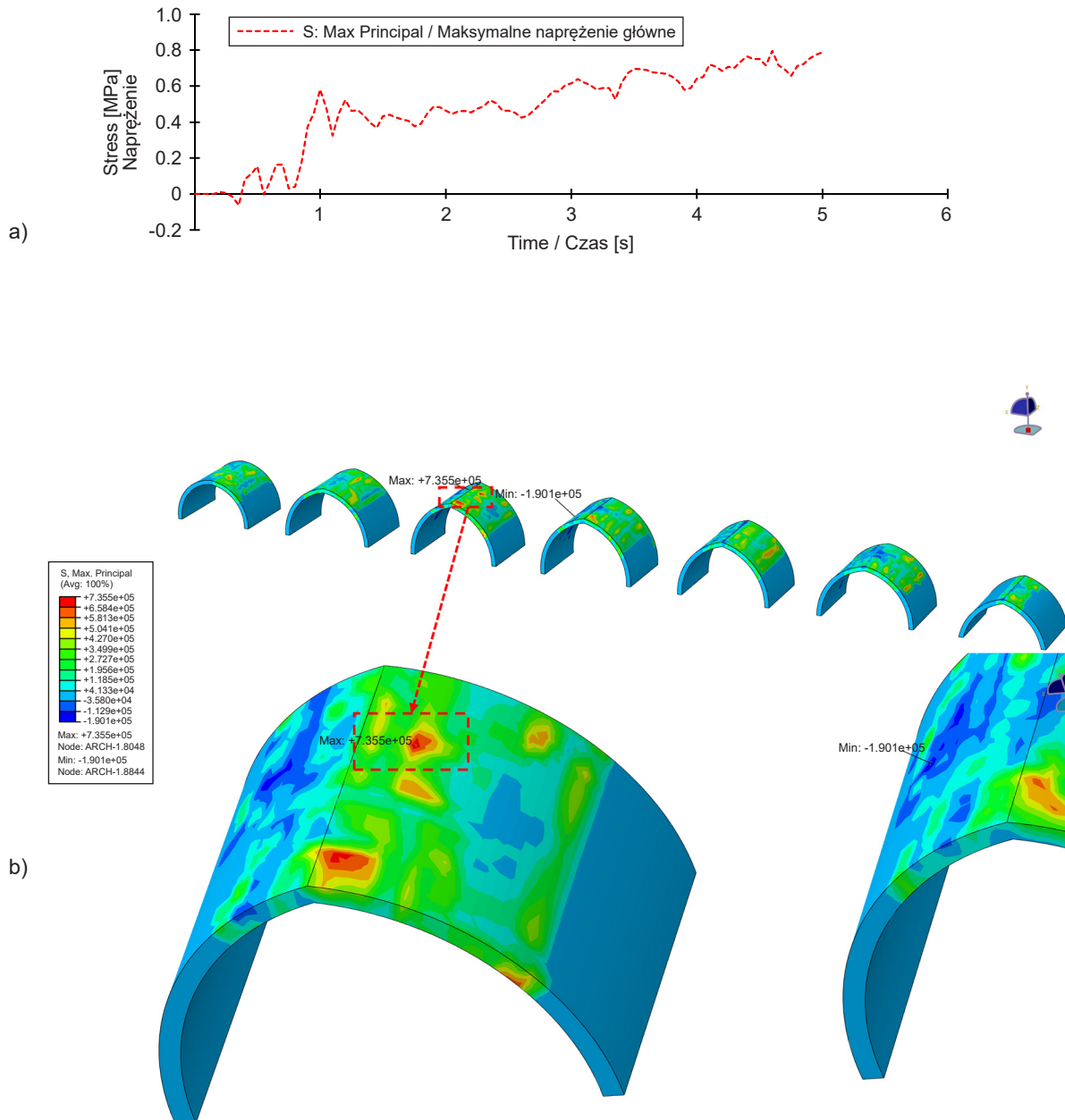


Fig. 14. Maximum principal stress contour maps of the arches: a) time histories, b) contour map
Rys. 14. Maksymalne naprężenia główne w łukach: a) przebieg w czasie, b) wykres konturowy

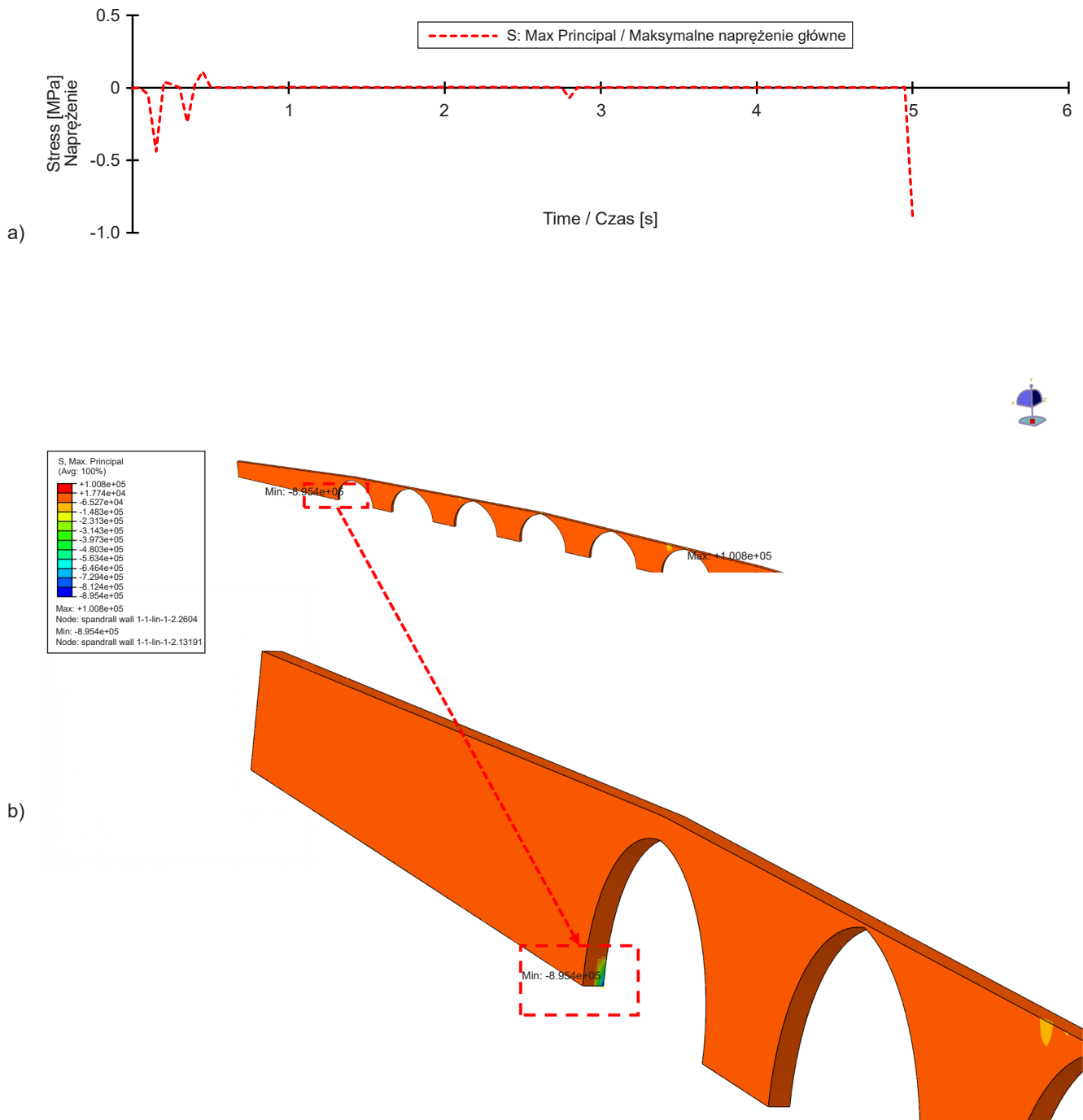


Fig. 15. Maximum principal stress of the spandrel wall: a) time histories, b) contour map

Rys. 15. Maksymalne napężenia główne w ścianie czołowej: a) przebieg w czasie, b) wykres konturowy

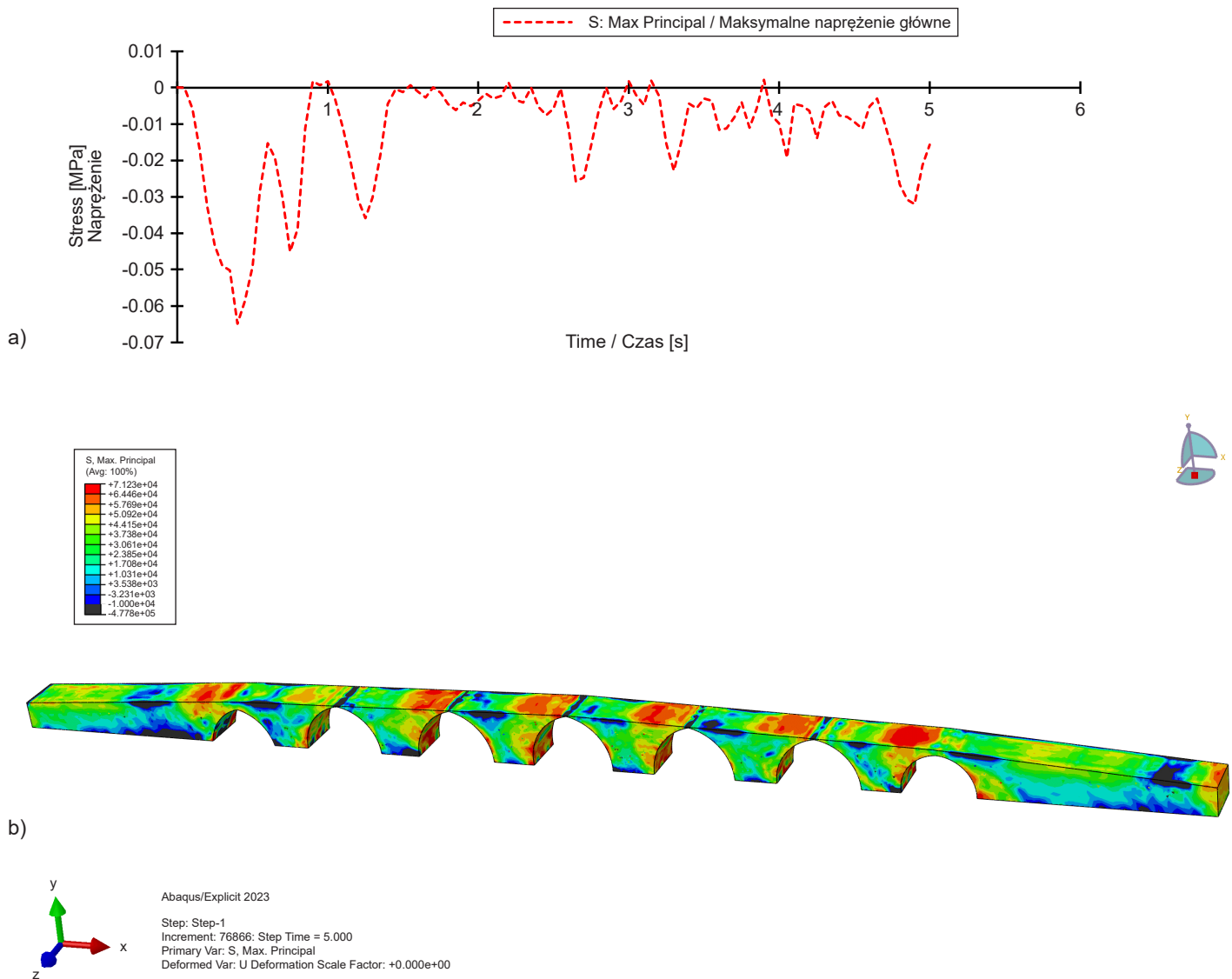


Fig. 16. Maximum principal stress of the infill: a) time histories, b) contour map

Rys. 16. Maksymalne napężenia główne w materiale zasypowym: a) przebieg w czasie, b) wykres konturowy

Na Rys. 17 i 18 przedstawiono zmienność najmniejszych naprężeń głównych, wraz z określonymi regionami koncentracji naprężeń. Analiza wykazała, że najmniejsze odnotowane naprężenia główne były poniżej 3,15 MPa, co jest wartością graniczną naprężeń ściskających w ścianach i stropach murowanych. Niemniej jednak, model wykazał podwyższone (bliskie dopuszczalnego limitu) naprężenia w wybranych przekrojach mostu.

Figs 17 and 18 depict the variations in minimum principal stresses and specific stress regions over time. The analysis revealed that the minimum principal stresses recorded were below 3.15 MPa, which represents the threshold for compressive stresses in masonry walls and vaults. Nevertheless, the model indicated elevated stresses in particular sections of the bridge that neared the maximum permissible limit.

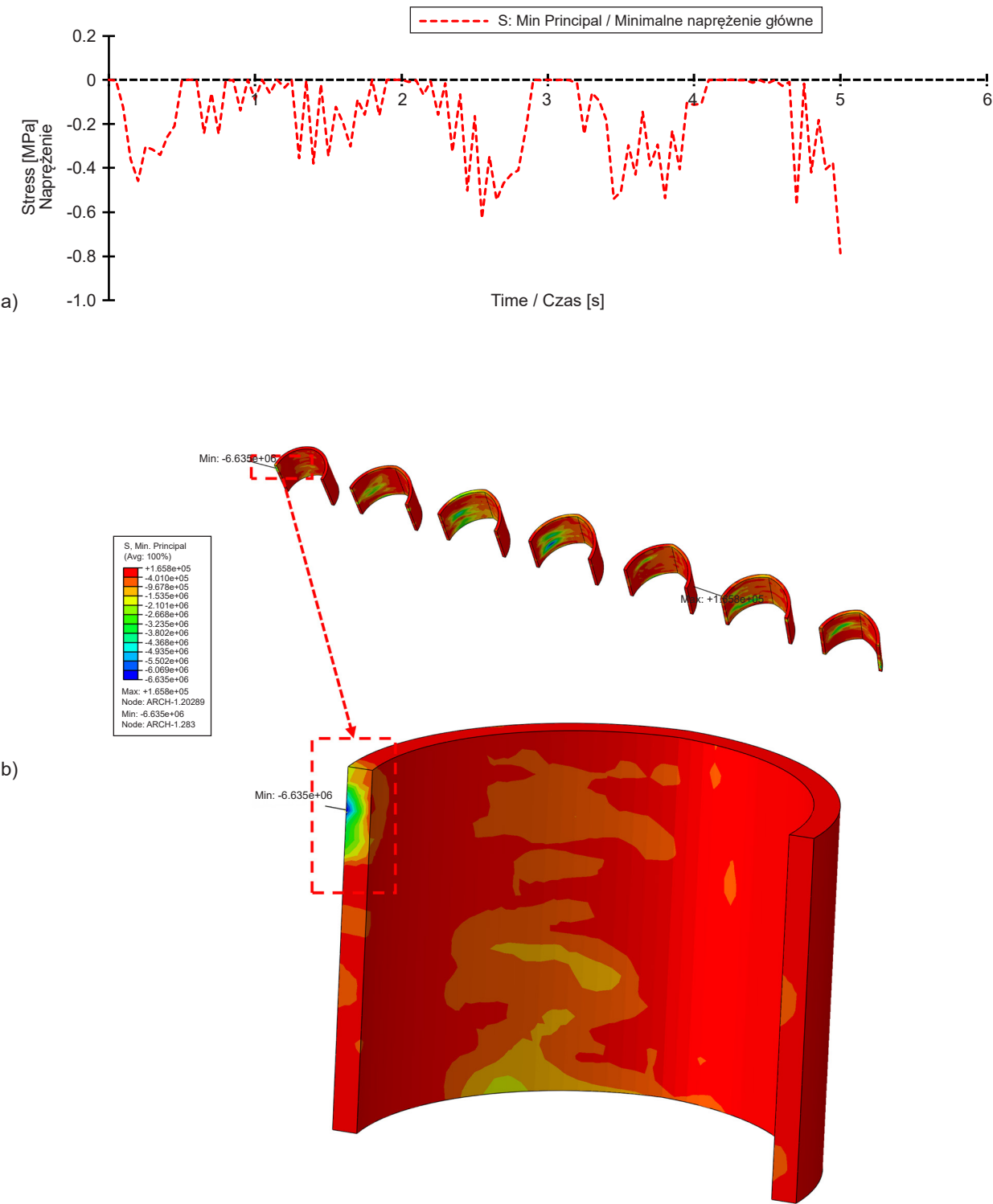


Fig. 17. Minimum principal stress of the arches: a) time histories, b) contour map
Rys. 17. Minimalne naprężenia główne w łukach: a) przebieg w czasie, b) wykres konturowy

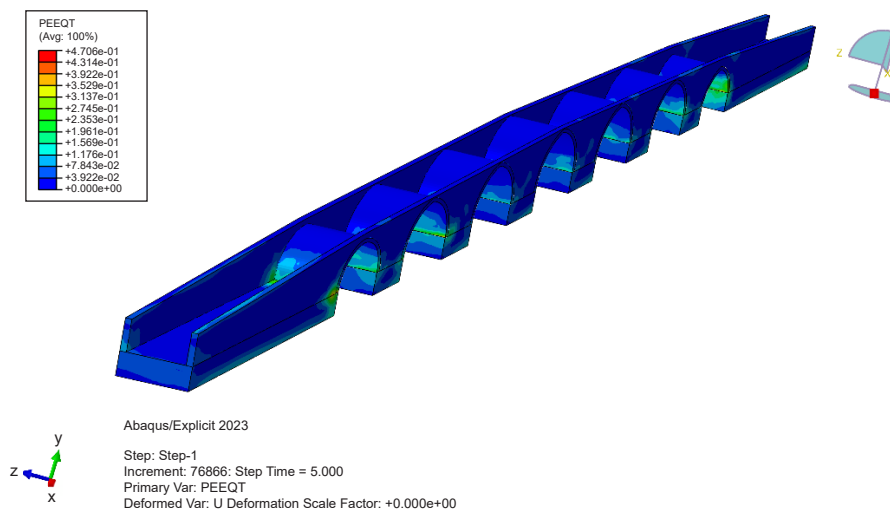


Fig. 18. Maximum principal strain of the bridge – contour map

Rys. 18. Maksymalne odkształcenia główne w moście – wykres konturowy

10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie analiz przedstawionych w artykule sformułowano następujące wnioski:

1. Na podstawie chmury danych pomiarowych można generować różnorodne obrazy: obrazy punktów z pojedynczych i wielokrotnych skanowań, obrazy parametryczne, obrazy punktów zintegrowane z AutoCAD oraz obrazy AutoCAD w 2D i 3D. Wykorzystane w przedstawionym badaniu obrazy mostu położonego w okolicy Diyarbakir w Turcji wygenerowano w oprogramowaniu FARO Scene oraz AutoCAD.
2. Wykazano skuteczność skaningu laserowego 3D w wykonywaniu precyzyjnej inwentaryzacji obiektów zabytkowych. Skaningu laserowego pozwala na pozyskiwanie szczegółowych skanów, generowanie położenia punktów oraz wgląd w charakterystykę konstrukcyjną i topograficzną badanego przypadku.
3. Wykonane skany bazowały na technologii przesunięcia fazowego; skaner emituje fale stałe o różnych długościach i mierzy odległość na podstawie analizy przesunięcia fazowego odbitego światła podczerwonego.
4. Dane w formie chmury punktów umożliwiły szczegółową analizę statyczną i dynamiczną konstrukcji mostu Halilviran.
5. Analiza wykazała podatność mostu na oddziaływania sejsmiczne i uwiarydlała potrzebę wykonania wzmocnienia – szczególnie ścian czołowych.

10. SUMMARY AND CONCLUSIONS

Based on the analyses carried out in this paper, the following conclusions were formulated:

1. Various images can be generated from point cloud data: single and multiple scan point cloud images, parametric images, AutoCAD-integrated point cloud images, and 2D/3D AutoCAD images. Images used in the presented research were generated using FARO Scene software and AutoCAD, with examples from a bridge in Diyarbakir, Turkey.
2. Effectiveness of 3D laser scanning for precise as-built documentation of historical structures has been demonstrated. Laser scanning enables one to create detailed scans, generate point cloud data and provide structural and topographical insights.
3. The performed scans employed a FARO scanner using phase shift technology, which projects continuous waves and measures distance by analyzing phase shifts in reflected infrared light.
4. Point cloud data supported a detailed structural and dynamic analysis of the Halilviran Bridge.
5. The analysis revealed the bridge's vulnerability to seismic forces and highlighted the need for structural reinforcement, especially in spandrel walls.
6. The bridge exhibits significant dynamic characteristics affecting its structural integrity.

6. Most wykazuje charakterystykę dynamiczną, która istotnie wpływa na jego integralność konstrukcyjną.
7. Analiza wskazuje, że most jest narażony na oddziaływania sejsmiczne; niezbędne są odpowiednie środki zaradcze, przeciwdziałające potencjalnym mechanizmom zniszczenia opartym na przemieszczeniach poprzecznych.
8. Wyniki uwydatniają potrzebę stosowania odpowiednich materiałów i technik renowacji celem ochrony zabytkowych mostów murowanych. Podkreślają również znaczenie zrozumienia charakterystyki elementów konstrukcyjnych i ich potencjału do poprawy odporności obiektu na zniszczenie.
7. Analysis indicated susceptibility to seismic forces, requiring specific retrofitting measures to address potential out-of-plane collapse mechanisms.
8. The results emphasize the need for proper restoration techniques and materials to safeguard historical masonry bridges. They also stress the importance of understanding structural components and their capacity to enhance the resilience against structural changes.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Małyszko L., Jemioło S., Gajewski M.D., Bilko P.*: FEM and Constitutive Modelling in Failure Analyses of Masonry Structures. Orthotropic Fail. Criteria. 1st WTA-International PhD Symposium, Leuven, Belgium, 2009, 371-394
- [2] *Armstrong D.M., Sibbald A., Fairfield C.A., Forde M.C.*: Modal Analysis for Masonry Arch Bridge Spandrell Wall Separation Identification. NDT & E International, **28**, 6, 1995, 377-386, DOI: 10.1016/0963-8695(95)00048-8
- [3] *Melbourne C., Tomor A.K., Wang J.*: Cyclic load capacity and endurance limit of multi-ring masonry arches. Proceedings of Arch Bridge IV "Advances in Assessment, Structural design and construction". CIMNE, Barcelona, 2004, 375-384
- [4] *Royles R., Hendry A.W.*: Model tests on masonry arches. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Part 2: Research and Theory, **91**, 1991, 299-321, DOI: 10.1680/iicep.1991.14997
- [5] *Begimgil M.*: Behaviour of Restrained 1.25 m Span Model Masonry Arch Bridge. In: Melbourne C. (ed.), First International Conference on Arch Bridges, Thomas Telford, Bolton, UK, 1995, 321-325
- [6] *Fanning P.J., Boothby T.E.*: Three-dimensional modelling and full-scale testing of stone arch bridges. Computers & Structures, **79**, 29-30, 2001, 2645-2662, DOI: 10.1016/S0045-7949(01)00109-2
- [7] *Fanning P.J., Sobczak L., Boothby T.E., Salomoni V.*: Load testing and model simulations for a stone arch bridge. Bridge Structures Assessment Design and Construction, **1**, 4, 2005, 367-378, DOI: 10.1080/15732480500453532
- [8] *Brencich A., Łatka D., Matysek P., Orban Z., Sterpi E.*: Compressive strength of solid clay brickwork of masonry bridges: Estimate through Schmidt Hammer tests. Construction and Building Materials, **306**, 2021, ID article: 124494, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124494
- [9] *Valente M., Milani G.*: Earthquake-induced damage assessment and partial failure mechanisms of an Italian Medieval castle. Engineering Failure Analysis, **99**, 2019, 292-309, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.02.008
- [10] *Sevim B., Bayraktar A., Altunışık A.C., Atamtürkür S., Birinci F.*: Finite element model calibration effects on the earthquake response of masonry arch bridges. Finite Elements in Analysis and Design, **47**, 7, 2011, 621-634, DOI: 10.1016/j.finel.2010.12.011
- [11] *Pelà L., Aprile A., Benedetti A.*: Comparison of seismic assessment procedures for masonry arch bridges. Construction and Building Materials, **38**, 2013, 381-394, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.046
- [12] *Yilmaz E.G., Sayin E., Özmen A.*: Dynamic analysis of historical masonry arch bridges under different earthquakes: The case of Murat Bey Bridge. Turkish Journal of Science and Technology, **17**, 2, 2022, 461-473, DOI: 10.55525/tjst.1105998
- [13] *Azar A.B., Sari A.*: Historical arch bridges-deterioration and restoration techniques. Civil Engineering Journal (Iran), **9**, 7, 2023, 1680-1696, DOI: 10.28991/CEJ-2023-09-07-010
- [14] *Kowalewski L., Gajewski M.*: Cohesive element approach for determination of masonry panels limit states. Chapter XI in monograph Theoretical Foundations of Civil Engineering, Structural Mechanics, **VII**, Eds. S. Jemioło & M. Gajewski, Warsaw, 2016, 133-146

- [15] Zampieri P., Zanini M.A., Faleschini F., Hofer L., Pellegrino C.: Failure analysis of masonry arch bridges subject to local pier scour. *Engineering Failure Analysis*, **79**, 2017, 371-384, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.05.028
- [16] Azar A.B., Sari A.: Structural failure of masonry arch bridges subjected to seismic action. *Civil Engineering Infrastructures Journal (Iran)*, 2024, 1-28, available online, DOI: 10.22059/CEIJ.2024.366834.1975
- [17] Hokelekli E., Yilmaz B.N.: Effect of cohesive contact of backfill with arch and spandrel walls of a historical masonry arch bridge on seismic response. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, **63**, 3, 2019, 926-937, DOI: 10.3311/PPci.14198
- [18] Özmen A., Sayin E.: Seismic response of a historical masonry bridge under near and far-fault ground motions. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, **65**, 3, 2021, 946-958, DOI: 10.3311/PPci.17832
- [19] Zhao C., Xiong Y., Zhong X., Shi Z., Yang S.: A two-phase modeling strategy for analyzing the failure process of masonry arches. *Engineering Structures*, **212**, 2020, ID article: 110525, DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110525
- [20] Bayraktar A., Hökelekli E.: Nonlinear soil deformability effects on the seismic damage mechanisms of brick and stone masonry arch bridges. *International Journal of Damage Mechanics*, **30**, 3, 2021, 431-452, DOI: 10.1177/105678952097442
- [21] Scozzese F., Ragni L., Tubaldi E., Gara F.: Modal properties variation and collapse assessment of masonry arch bridges under scour action. *Engineering Structures*, **199**, 2019, ID article: 109665, DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109665
- [22] Pulatsu B., Erdogmus E., Lourenço P.B.: Comparison of In-Plane and Out-of-Plane Failure Modes of Masonry Arch Bridges Using Discontinuum Analysis. *Engineering Structures*, **178**, 2019, 24-36, DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.10.016
- [23] Franck S.A., Bretschneider N., Slowik V.: safety analysis of existing masonry arch bridges by nonlinear finite element simulations. *International Journal of Damage Mechanics*, **29**, 1, 2020, 126-143, DOI: 10.1177/1056789519865995
- [24] Azar A.B., Sari A.: Seismic assessment of historical bridge: Numerical modeling and structural evaluation. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, **11**, 4, 2023, 127-135, <https://www.sciepub.com/ajcea/abstract/15681>, 09.09.2024
- [25] Han Y., Chun Q., Gao X.: Flood-induced forces and collapse mechanism of historical multi-span masonry arch bridges: The Putang bridge case. *Engineering Failure Analysis*, **153**, 2023, ID article: 107564, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107564
- [26] Wang Z., Yang J., Zhou J., Yan K., Zhang Z., Zou Y.: Strengthening of existing stone arch bridges using UHPC: Theoretical analysis and case study. *Structures*, **43**, 2022, 805-821, DOI: 10.1016/j.istruc.2022.06.055
- [27] Gönen S., Soyöz S.: Reliability-based seismic performance of masonry arch bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*, **18**, 12, 2022, 1658-1673, DOI: 10.1080/15732479.2021.1918726
- [28] Zizi M., Chisari C., De Matteis G.: Effect of the backfill material in the seismic response of multi-span masonry arch bridges under seismic loading. *Procedia Structural Integrity*, **44**, 2023, 673-680, DOI: 10.1016/j.prostr.2023.01.088
- [29] Pantò B., Grosman S., Macorini L., Izzuddin B.A.: A macro-modelling continuum approach with embedded discontinuities for the assessment of masonry arch bridges under earthquake loading. *Engineering Structures*, **269**, 2022, ID article: 114722, DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114722
- [30] Silva R., Costa C., Arêde A.: Numerical methodologies for the analysis of stone arch bridges with damage under railway loading. *Structures*, **39**, 2022, 573-592, DOI: 10.1016/j.istruc.2022.03.063
- [31] Kocaman İ., Yılmaz M., Tosunoğlu F., Kazaz İ.: The behavior of the historical Çobandede bridge under flood load. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, **5**, 4, 2022, 249-263, DOI: 10.31462/jseam.2022.04249263
- [32] Silva R., Costa C., Arêde A., Ribeiro D.: Numerical simulations of experimental material testing in stone masonry arch railway bridge. *Structure and Infrastructure Engineering*, **20**, 5, 2024, 633-652, DOI: 10.1080/15732479.2022.2119585
- [33] Dong Z.Q., Li G., Song B., Lu G.H., Li H.N.: Failure risk assessment method of masonry structures under earthquakes and flood scouring. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, **29**, 21, 2022, 3055-3066, DOI: 10.1080/15376494.2021.1884322
- [34] Dorji J., Zahra T., Thambiratnam D., Lee D.: Strength assessment of old masonry arch bridges through moderate destructive testing methods. *Construction and Building Materials*, **278**, 2021, ID article: 122391, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122391
- [35] Saygılı Ö., Lemos J.V.: Seismic vulnerability assessment of masonry arch bridges. *Structures*, **33**, 2021, 3311-3323, DOI: 10.1016/j.istruc.2021.06.057
- [36] Bayraktar A., Hökelekli E.: Nonlinear soil deformability effects on the seismic damage mechanisms of brick and stone masonry arch bridges. *International Journal of Damage Mechanics*, **30**, 3, 2021, 431-452, DOI: 10.1177/1056789520974423