

MAHTISA KIVANI¹⁾ALI KEYHANI²⁾

HEALTH MONITORING OF THE VERESK BRIDGE BY COMPARING THE RESULTS OF PRECISION INSTRUMENT MEASUREMENTS AND MODELLING WITH ABAQUS SOFTWARE AND WAVELET FUNCTION

MONITORING STANU MOSTU VERESK – PORÓWNANIE WYNIKÓW UZYSKANYCH Z PRECYZYJNYCH PRZYRZĄDÓW POMIAROWYCH ORAZ Z MODELOWANIA Z ZASTOSOWANIEM PROGRAMU ABAQUS I FUNKCJI FALKOWEJ

STRESZCZENIE. Identyfikacja i klasyfikacja uszkodzeń konstrukcji nośnej stanowi niezwykle ważny aspekt utrzymania mostów. Odpowiednio szybkie rozpoznanie lokalnych uszkodzeń pozwala na ograniczenie kosztów i problemów związanych z ich naprawą w porównaniu do konieczności remontu całej konstrukcji. Aby określić podatność obiektów na oddziaływanie sejsmiczne lub zbadać związane z nimi uszkodzenia często przeprowadza się ocenę stanu technicznego mostów, zapór i budynków. Celem niniejszej pracy jest zbadanie uszkodzeń i ogólnego stanu technicznego mostu kolejowego w Veresk, który jest eksploatowany od ponad 90 lat. W tym celu wykonano model mostu w oprogramowaniu ABAQUS przeznaczonym do analizy metodą elementów skończonych. Uzyskano postacie drgań własnych konstrukcji – pozycje określono jako punkty maksymalne w programie MATLAB – po czym zastosowano do nich transformację falkową. Wyniki analizy wykazały, że transformacja falkowa jest bardzo dokładna, a uzyskane wartości są zbliżone do rzeczywistych wyników pomiarów wykonanych na moście.

SŁOWA KLUCZOWE: ABAQUS, most Veresk, precyzyjne przyrządy pomiarowe, transformacja falkowa.

ABSTRACT. Identification and classification of structural failures is a vital aspect of bridge maintenance. When local structural damage is identified without delay, its repair is less expensive and problematic than in the case of general damage. To determine seismic vulnerability or post-seismic damage, structural health assessments are frequently performed on bridges, dams, and buildings. The aim of this study is to keep track of the overall health of the Veresk Railway Bridge, which has been in service for over 90 years. For this purpose, the structure was modeled in the ABAQUS finite element software. Mode shapes of the structure were then extracted, the positions were determined as maximum points using MATLAB software, and a wavelet function was applied to these shapes. The results showed that the wavelet function is highly accurate and its results are close to the real values measured for the bridge.

KEYWORDS: ABAQUS, precision instruments, Veresk Bridge, wavelet function.

DOI: 10.7409/rabd.023.009

¹⁾ Islamic Azad University, Department of Civil Engineering, Shahrood Branch, Shahrood, Iran; mahtisakivani@gmail.com (✉)

²⁾ Shahrood University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Shahrood, P.O. Box: 361995161, Iran; akeyhani@shahroodutt.ac.ir

1. WSTĘP

Rozwój pęknięć w elementach konstrukcji może spowodować jej lokalną awarię i uszkodzenia całkowite. Nagłe awarie elementów konstrukcyjnych wiążą się z niezwykle wysokimi kosztami i mogą skutkować utratą zdrowia lub życia użytkowników [1]. Bardzo ważną kwestią jest zatem możliwie szybkie wykrywanie pęknięć – zanim przyczynią się one do poważnych problemów. Mosty należą do najważniejszych konstrukcji inżynierskich; w niniejszej pracy przeanalizowano most kolejowy Veresk w Iranie, mający ogromne znaczenie historyczne.

W przypadku mostów, zapór i budynków często dokonuje się oceny stanu technicznego celem określenia podatności na oddziaływania sejsmiczne lub zbadania związanych z nimi uszkodzeń. Do monitoringu konstrukcji stosuje się akcelerometrię, tensometrię, czujniki piezoelektryczne i światłowodowe, czujniki korozji czy czujniki akustyczne [2, 3]. Wykorzystano czujniki akustyczne o zakresie pomiaru powyżej –400 dB. Czujniki te są niedrogie i lekkie, można więc instalować je w dużych ilościach. Algorytmy wykrywania uszkodzeń bazują na danych o odkształceniach. Odkształcenia są więc istotnym czynnikiem w określaniu lokalnych uszkodzeń konstrukcji [4-6]. Czujniki wykorzystywane są zwykle do mierzenia uszkodzeń powstających w konstrukcjach pod wpływem zmian odkształceń po przyłożeniu pewnej siły, tak jak w przypadku trzęsienia ziemi. Na konstrukcje takie jak wieże czy mosty oddziałują również ciągle siły poziome – na przykład obciążenia od wiatru. Analiza takich konstrukcji wymaga pomiaru parametrów dynamicznych, które uzyskuje się z pomocą akcelerometrów [7]. Czujniki te mierzą przyspieszenia konstrukcji w sposób ciągły; diagnozy uszkodzeń dokonuje się poprzez analizę przyspieszenia w aspekcie częstotliwości. A zatem na podstawie pomierzonych częstotliwości uzyskuje się zmiany odkształcenia i określa stan konstrukcji. Nieniszczące metody wykrywania uszkodzeń podzielić można na dwie kategorie: metody lokalne i całościowe. W przeszłości szeroko stosowano metody lokalne – w tym ocenę wizualną i metody akustyczne, ultradźwiękowe, radiograficzne itd. Metody te pozwalają na wykrywanie uszkodzeń na powierzchni elementów lub płytko pod nią [8, 9]. Sposobem na uniknięcie tego ograniczenia jest zastosowanie kompleksowych metod wykrywania uszkodzeń. Wystąpienie uszkodzeń w elementach konstrukcyjnych powoduje zmianę parametrów fizycznych konstrukcji. Ponadto, jak wiadomo, odpowiedź konstrukcji i jej drgania zależne są od parametrów fizycznych, zatem ich zmiana powoduje również zmianę odpowiedzi dynamicznej, a także i drgań konstrukcji. Na fali tym bazują nowe metody wykrywania uszkodzeń, znane jako metody kompleksowe. Podstawową ideą tych metod jest porównanie odpowiedzi konstrukcji nieuszkodzonej

1. INTRODUCTION

Development of cracks in the members of a structure may be the cause of breakage and general damage. Sudden failure of structural elements is extremely expensive and may result in loss of life [1]. Therefore, it is crucial to spot structural cracks as soon as possible and prevent them from becoming serious issues. The most significant structures include bridges; in this study the Veresk Bridge in Iran will be examined due to its historical significance.

In bridges, dams, and buildings, structural health assessment is commonly used to calculate seismic damage or post-seismic damage. Accelerometers, strain sensors, piezoelectric material sensors, fiber optics, corrosion sensors, and sound emission sensors are used to monitor the health of structures [2, 3]. Acoustic sensors with an accuracy of measurement above –400 dB were used. These inexpensive and lightweight sensors can be installed in large numbers. Damage detection algorithms rely on strain information. As a result, strain is an important factor in determining local structural damage [4-6]. Sensors are mainly used to measure damage that occurs in structures due to changes in strain after a certain force is applied, like in the case of an earthquake. For structures such as towers or bridges, the force acts horizontally and continuously, for example in the form of wind load. To evaluate such structures, dynamic parameters must be measured; they are obtained using accelerometers [7]. These sensors measure the acceleration of the structure continuously and the damage diagnosis is performed by converting this acceleration into the frequency domain. Therefore, the measured frequency is used to obtain the change in strain and finally to determine the health of the structure. Non-destructive Damage Detection (NDD) methods are divided into two categories: local and general. In the past, local damage determination methods – including methods such as acoustic, ultrasonic, radiography, etc. – were widely used. These methods can detect damage on the surface or near the surface of the structure [8, 9]. A way to overcome this limitation is to use general failure detection methods. Occurrence of damage in structural members causes a change in the physical characteristics of the structure. In addition, it is a known fact that structural responses and structural vibrations are dependent on physical characteristics. Therefore, a change in the physical characteristics causes a change in the responses of the structure and its vibrations. This point serves as the basis for development of new methods for structural fault finding, known as the general methods. They are based on the comparison of the responses of the healthy structure with the responses of the damaged structure and drawing conclusions based on their analysis.

oraz uszkodzonej; z takiej analizy wyciąga się wnioski dotyczące stanu konstrukcji.

Nowatorską metodą na tym polu jest precyzyjne pozycjonowanie PPP (ang. *Precise Point Positioning*), pozwalające na dokładne określenie pozycji w oddziaływaniach całościowych dynamicznych [10, 11]. Ograniczeniem czujników GPS jest fakt, że wysoka częstotliwość próbkowania wymaga dużej liczby punktów obserwacji. Możliwe jest zniwelowanie tego ograniczenia poprzez zastosowanie systemów GNSS-PPP (korzystających z satelitów nawigacyjnych z innych sieci niż GPS) w połączeniu z modułami GPS dużej prędkości [12-14]. Przetworniki piezoceramiczne, wykorzystujące metodę propagacji dźwięku, stosowane są jako czujniki do monitorowania korozji betonu zbrojonego [15]. Czujniki światłowodowe FBG są wrażliwe na temperaturę i odkształcenie. W związku z tym podczas pomiarów odkształceń możliwe jest zarejestrowanie danych związanych ze zmianami termicznymi. Odpowiedzi na odkształcenia i zmiany temperatury są mierzone w dwóch różnych zakresach fali świetlnej, co pozwala na zredukowanie zakłóceń pomiarów. W jednym z badań w tym obszarze opracowano metodę wykorzystującą wskaźnik uszkodzenia oparty na zasadach geometrii euklidesowej. W metodzie tej wykorzystuje się zmiany temperatury oraz odkształcenia przez nie wywołane, do diagnozy uszkodzeń konstrukcji, a odkształcenie wywołane temperaturą jest jedną ze składowych odkształceń całkowitych. Pomierzone wartości mogą posłużyć do identyfikacji źródła obserwowanych problemów. Jako że możliwe jest zmierzenie redukcji sztywności dla obszarów obejmujących wiele uszkodzonych lokalizacji, technika ta może być przydatna w długoterminowym monitoringu mostów [16]. Niemniej jednak, ze względu na ograniczenia metody, nadal niezbędna jest kontrola wizualna [17]. Dzięki ich odpowiedniej czułości na odkształcenia oraz łatwości montażu na powierzchni konstrukcji, zastosowanie wielofunkcyjnych czujników, takich jak FBG, może zaowocować ograniczeniem ogólnej liczby sensorów niezbędnych do przeprowadzenia analizy. Wyniki zmian odkształceń dynamicznych wraz ze zmianami temperatury zarejestrowane przez tensometr rezystancyjny są bardzo zbliżone do wyników z systemu FBG [18].

Rozwijane i badane są metody kompleksowe oparte na zmianach parametrów drgań. Analizy lokalne i globalne powinny się uzupełniać, z uwzględnieniem wymagań konkretnej konstrukcji. Głównym celem metod oceny uszkodzeń na podstawie drgań całkowitych jest wyznaczenie wskaźników wrażliwych na takie uszkodzenia. Użytecznymi wskaźnikami okazały się m.in. częstotliwości drgań własnych, postacie drgań własnych, krzywizna postaci drgań, macierz podatności czy macierz sztywności. Do określania uszkodzeń stosuje się energię odkształcenia, zmiany sztywności, funkcje zmiany

Accurate point positioning is a new method that has emerged in this field. Precise Point Positioning (PPP) is a novel method for determining the precise position in dynamic situations [10, 11]. One limitation of GPS sensors is that high frequency sampling requires a large number of observations. It is possible to overcome this limitation by using GNSS-PPP (can use navigational satellites from other networks beyond the GPS) in conjunction with high-speed GPS [12-14]. Piezoceramic lead transducers, which use the sound propagation method, are used as sensors to monitor corrosion in reinforced concrete [15]. Fiber optic sensors FBG are sensitive to temperature and strain. Therefore, when strain is being measured, strain information brought on by thermal changes may also be received. The strain and temperature responses are measured in two different light modes to reduce this cross-sensitivity. A method based on the damage index based on the Euclidean distance was developed in one of the studies performed in this area. It uses temperature changes and strains caused by temperature changes to diagnose structural damage, and the strain caused by temperature is one of the strain details. The measured value may be employed to identify the source of the observed issues. Since the stiffness reduction for areas with multiple damaged locations can be measured, this technique can be used for long-term bridge monitoring [16]. However, due to the limitations of this method and the lack of a hardening reduction, visual inspection is required for such damage [17]. Due to their appropriate sensitivity to strain and ease of installation on the surface of the structure, multi-purpose sensors like the FBG sensor can be easily used for analysis in order to reduce the number of sensors. The dynamic strain results recorded by the resistive strain sensor with temperature changes and the measurement results of the FBG system are very similar [18].

General methods incorporating changes in vibration parameters are being developed and studied. General and local approaches should complement one another, taking into account the requirements of the specific structure. The main goal of the methods for evaluating structural damage based on general vibration is to identify indicators that are responsive to such damage. Natural frequencies, mode shapes, mode shape curvature, softness matrix, hardness matrix, etc., proved useful as indicators. Modal strain energy, changes in flexibility, frequency response functions, wavelet transforms, and mode shape changes and frequencies are all examples of methods used to determine damage. Most of the damage evaluation methods based on vibration require the modal characteristics of

częstotliwości, transformacje falkowe czy zmiany w postaciach i częstotliwościach drgań własnych. Większość metod oceny uszkodzeń na podstawie drgań wymaga charakterystyki modalnej uzyskanej dzięki transformacji Fouriera. Transformacja Fouriera stanowi najpopularniejsze narzędzie w przetwarzaniu sygnałów. W 1807 roku francuski matematyk Joseph Fourier odkrył, że każda funkcja ciągła może być wyrażona jako suma funkcji trygonometrycznych. Kilka własności transformacji Fouriera wpływa na dokładność określenia uszkodzeń. Transformacja Fouriera pozwala na przeniesienie sygnału z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości. Jedną z wad tej transformacji jest fakt, że informacja o jej przebiegu czasowym nie jest widoczna i niemożliwe jest tym samym stwierdzenie, gdzie i kiedy wystąpił błąd transformacji [19].

Analiza oparta na transformacji falkowej to względnie nowe i bardzo obiecujące osiągnięcie matematyczne, bazujące na kilku dziesięcioleciach badań w dziedzinie analizy harmonicznej. Dzisiaj znajduje ono zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i inżynierii. Transformacja ta jest stosowana przez inżynierów w analizie przejściowej do rozpatrywania zjawisk zależnych od czasu. Transformacja falkowa jest jedną z najważniejszych technik wczesnego diagnozowania uszkodzeń strukturalnych w inżynierii lądowej i lotniczej.

Most Veresk, stanowiący jeden ze strategicznych mostów Iranu, został zbudowany przez niemieckich i austriackich inżynierów z gwarancją obejmującą 70-letni okres eksploatacji. Termin „trzy złote linie” odnosi się do odcinka Kolei Transirańskiej biegnącego po zboczu doliny między mostem Veresk a miejscowością Gadook na zachód od drogi Teheran-Północ. Linia przecina ten teren trzykrotnie na różnych wysokościach, co ma na celu obniżenie pochylenia profilu podłużnego i optymalne wykorzystanie parametrów trakcyjnych. W konstrukcji mostu nie wykorzystano zbrojenia; został on wzniesiony z elementów przestrzennych i zaprawy z cementu i piasku. Monitorowanie stanu tej historycznej konstrukcji ma ogromne znaczenie. W niniejszej pracy zastosowano nową, skuteczną metodę wykrywania spękań w konstrukcjach tego typu. Ze względu na fakt, że pęknięcia w niektórych elementach konstrukcyjnych powodują spadek ich sztywności, spękania modeluje się jako elementy z obniżoną sztywnością. Wykrywanie uszkodzeń przebiega dwuetapowo – najpierw dokonuje się lokalizacji uszkodzenia, a następnie opisuje się jego rozmiar. Po zlokalizowaniu uszkodzeń określa się ich stopień (tj. procentowy spadek sztywności oryginalnego elementu), montując czujniki w tych miejscach.

2. MATERIAŁY I METODY BADAWCZE

Dzięki postępowi w dziedzinie monitoringu stanu konstrukcji, wprowadzono w nim technologię połączenia różnych

the temporal signal obtained by the Fourier transform. The Fourier transform is the most widespread signal analysis method. In 1807, the French mathematician Joseph Fourier discovered that any continuous function can be expressed as a sum of trigonometric functions. There are few intrinsic characteristics of the Fourier transform that affect the accuracy of damage determination. The Fourier transform involves transferring the signal from the time domain to the frequency domain. One of the disadvantages of the Fourier transform is that the time information is not seen in the transmission and it is not possible to determine when and where the error occurred [19].

Wavelet analysis is one of the relatively new and exciting achievements of pure mathematics, which is based on several decades of research in harmonic analysis. Today, important applications have been found in many fields of science and engineering. This transform is used by engineers in transient analysis to investigate phenomena that are time-dependent. Wavelet transform is one of the most crucial techniques for the early diagnosis of structural damage in civil and aerospace engineering.

One of Iran's strategic bridges, The Veresk Bridge was built by German and Austrian engineers with a 70-year guarantee. The term “Three Golden Lines” of the North Railway is related to the segment of railway running on the wall of the valley between the Varesk Bridge and Gadook east of the Tehran-North road. The line crosses the area three times at different heights so as to lessen the slope and boost locomotive power factor. No reinforcement was utilized in this structure; it was built of spatial elements and mortar made of washed cement and sand. Controlling its health is vital due to the significance of this historical structure. In this research, a new and efficient method was adopted in order to identify cracks in structures of this type. Due to the fact that cracks in some elements of structural members reduce their hardness, cracks are modeled as elements with reduced hardness. Flaw identification is accomplished in two stages: locating the defect and describing the defect size. The damaged locations are identified in the first stage, and the degree of damage, i.e. the percentage of reduction in the hardness of the original elements, is determined in the second stage by installing sensors in these places.

2. MATERIALS AND RESEARCH METHODS

With advancements in monitoring of the health of structures, sensor fusion technology has been introduced in this

rodzjów czujników, a zintegrowanie dużej liczby czujników wspomaga proces decyzyjny i ogranicza niepewność pomiaru [20, 21]. W niniejszej pracy użyto oprogramowania ABAQUS 6.11 do zamodelowania i analizy uszkodzeń mostu metodą elementów skończonych. Do modelowania elementów zginanych w programie ABAQUS wykorzystano element typu Solid. Elementy tego typu mogą być stosowane do przedstawiania powłok i elementów zginanych. Obciążenia można przyłożyć do ścian elementu także pionowo. Element ma sześć stopni swobody – trzy przemieszczeniowe i trzy obrotowe. Elementy Solid mogą modelować zmiany wytrzymałości zależne od odkształcenia oraz znaczne przemieszczenia. Geometria takiego elementu przedstawiona jest na Rys. 1.

W przypadku konstrukcji poddanej drganiom wywołanym różnorodnymi wzbudzeniami niezbędne jest prowadzenie analizy modalnej na każdym etapie projektu. Analiza modalna pozwala na zidentyfikowanie częstotliwości oraz postaci drgań własnych. Należy zauważyć, że analiza modalna jest liniowa, a wszelkie efekty nieliniowe są w niej pomijane. Może ona posłużyć za punkt wyjścia do bardziej szczegółowych analiz dynamicznych, takich jak dynamiczna analiza przejściowa, analiza harmoniczna czy analiza widmowa. W niniejszym badaniu zastosowano liniową analizę modalną. Jak wspomniano powyżej, podstawowa idea metod kompleksowych polega na wprowadzaniu zmian w parametrach fizycznych konstrukcji, co z kolei przekłada się na zmianę jej odpowiedzi na obciążenia. Na przykład spowodowane obciążeniami obniżenie sztywności może wywołać zmianę częstotliwości drgań własnych oraz innych aspektów odpowiedzi konstrukcji [22]. Jak widać, uszkodzenia można uwzględnić dzięki ocenie reakcji konstrukcji oraz modyfikacji jej wzorców drgań. Lokalizację oraz ilość uszkodzeń w elementach konstrukcyjnych określić można dzięki porównaniu reakcji konstrukcji uszkodzonej z reakcjami konstrukcji nieuszkodzonej.

3. PRZYJĘCIE W MODELU OBCIĄŻEŃ RUCHOMYCH DLA MOSTU VERESK

Jako obciążenia ruchome w modelu analitycznym zastosowano trzy różne rodzaje obciążeń. Obciążenia stanowiły kombinacje lokomotyw GT26 oraz wagonów towarowych, zgodnie z Przepisami technicznymi i wykonawczymi Iranu nr 139: „Obciążenia normowe mostów” [23]. Szczegółowe dane lokomotyw i wagonów towarowych przedstawiono w Tabl. 1. Na Rys. 2 pokazano także obciążenie ruchome mostów zaczerpnięte z Przepisów nr 139. Należy zauważyć, że celem zweryfikowania wyników uzyskanych z modelu z rzeczywistymi wynikami z badań obciążeniowych zastosowano rodzaj obciążenia ruchomego nr 2, składający się z dwóch lokomotyw i dwóch wagonów towarowych. Rys. 3 przedstawia charakterystykę geometryczną badanego mostu.

industry, whereby integrating numerous sensors improves decision-making performance and hence reduces uncertainty [20, 21]. In this research, ABAQUS 6.11 software was used for modelling and analysis of bridge finite elements, and Solid element was used for modelling of the bending plates in the ABAQUS software. This element can represent shell and bending members. Loads can be applied vertically on the page or inside the page. This element has six degrees of freedom – three directions of displacement, and three directions of rotation. The Solid element can model stress hardening and significant displacements. Fig. 1 shows its geometry.

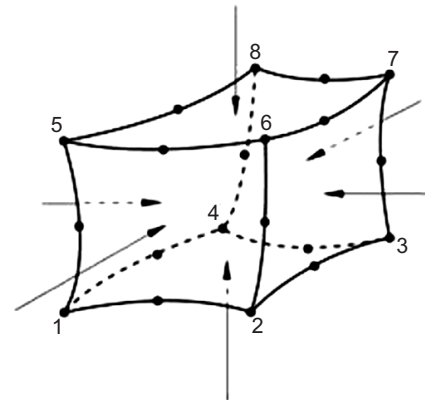


Fig. 1. An example of the Solid element in the ABAQUS software Rys. 1. Przykład zobrazowania elementu Solid siatki obliczeniowej w oprogramowaniu ABAQUS

Modal analysis must be performed at every step of design for a structure that is subjected to oscillations caused by loads and vibration stimuli. Natural frequencies and mode forms in those frequencies are discovered via modal analysis. It is important to note that modal analysis is linear, and any non-linear features are neglected. This analysis can serve as a starting point for more detailed dynamic analyses such as transient dynamic analyses, harmonic response analysis, or spectrum analysis. In this study, modal linear analysis was applied. As already mentioned, the main idea of the general methods is to introduce changes in the physical characteristics of the structure, which, in turn, cause changes in its responses. For example, reduction in stiffness due to damage may change the natural frequency and other responses of the structure [22]. Therefore, it is evident that damage can be incorporated by evaluating the reactions and modifying the structure's vibration patterns. The location and quantity of damage in the structure's members is identified by studying and comparing the reactions of the damaged structure with the responses of the healthy structure.

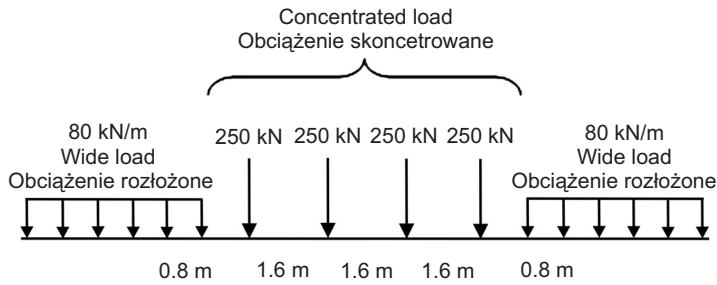


Fig. 2. Standard loading of railway bridges

Rys. 2. Obciążenie normowe mostów kolejowych

Table 1. Locomotive and freight wagon loading specifications

Tablica 1. Specyfikacje lokomotyw i wagonów towarowych użytych jako obciążenie ruchome

Device Pojazd	Number of axles Liczba osi	Full weight [t] Masa całkowita	Center distance of two bogies [m] Odległość między środkami wózków	Bogie axle distance [m] Odległość między osiami wózka	Length (buffer plate to buffer plate) [m] Długość od bufora do bufora (między zderzakami)
GT26 locomotive Lokomotywa GT26	6	110.97	12.5	1.69 - 2.02	21.1
Grain transportation unit Wagon zbożowy	4	76	9.86	1.8	15.06

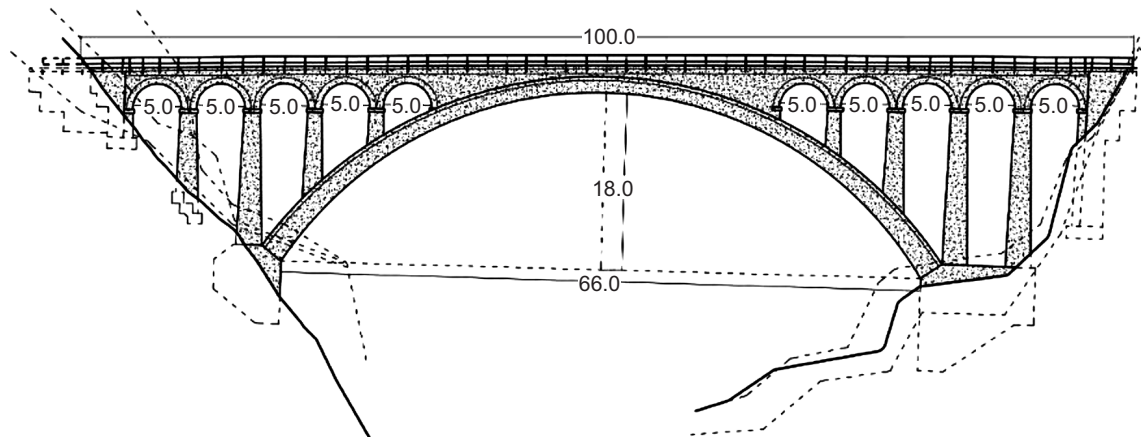


Fig. 3. Sketch and dimensions of the main arch of the bridge [m]

Rys. 3. Szkic i wymiary łuku głównego badanego mostu [m]

3. ADOPTING IN MODEL THE LIVE LOADS OF THE VERESK BRIDGE

Three different types of loads were applied as the analytical model's live load. Loading was applied as combinations of GT26 locomotives and cargo wagons according to Regulations of the technical and executive system of the Islamic Republic of Iran No. 139 "Standard Loads for Bridges" [23]. The details of locomotives and freight wagons are presented in Table 1. Fig. 2 also shows the live loading of railroad bridges as taken from Regulations No.139. It should be noted that in order to validate the results of the model with the results of the loading test, a second type of live load was used, consisting of two locomotives and two freight wagons. Fig. 3 shows the geometric characteristics of the bridge.

4. PRZYGOTOWANIE DO POMIARÓW I OBCIĄŻENIE MOSTU

4.1. OBCIĄŻENIE STATYCZNE

Jako oprzyrządowanie pomiarowe na moście Veresk zastosowano zestaw 16 czujników. W jego skład wchodziły sensory LVDT i DCDT, akcelerometr, tensometr i sejsmograf. Most obciążano dwiema lokomotywami GT26 oraz dwoma wagonami ze zbożem.

4. PREPARATION FOR MEASURING AND BRIDGE LOADING

4.1. STATIC LOADING

A set of 16 sensors was used for the instrumentation of the Veresk Bridge. The sensors included LVDT and DCDT displacement sensors, accelerometer, strain gauge and seismograph. Two GT26 locomotives and two grain wagons were used to load the bridge.

W teście statycznym, gdy pociąg jechał z Dowgol do Veresk (w kierunku północnym), wagony towarowe poruszały się przed lokomotywami. W drodze z Veresk do Dowgol (w kierunku południowym) lokomotywy jechały na czele pociągu. W Tabl. 2 przedstawiono specyfikacje badań. Podczas obciążenia statycznego pociąg poruszał się po moście z minimalną możliwą prędkością (około 3 km/h); podczas jazdy w obu kierunkach rejestrowano wskazania czujników.

In the static tests, when the train was passing from Dowgol to Veresk (northward), freight cars moved over the bridge in front of the diesels. On the route from Veresk to Dowgol (southward), the diesels moved ahead of the wagons. Table 2 shows the specifications of the tests. In these tests, the train passed over the bridge at the minimum possible uniform speed (about 3 km/h) in both directions and the data from the sensors was recorded.

Table 2. Specifications of static tests

Tablica 2. Specyfikacje przeprowadzonych badań statycznych

Test No. Nr badania	Direction of movement Trasa (kierunek) jazdy	Arrangement of the passing train Skład przejeżdżającego pociągu	Speed [km/h] Prędkość
1	from Dowgol to Veresk (northward) z Dowgol do Veresk (na północ)	Wagon-wagon-diesel-diesel Wagon-wagon-lokomotywa-lokomotywa	2.8
2	from Dowgol to Veresk (northward) Z Dowgol do Veresk (na północ)	Wagon-wagon-diesel-diesel Wagon-wagon-lokomotywa-lokomotywa	3.5
3	from Veresk to Dowgol (southward) z Veresk do Dowgol (na południe)	Diesel-diesel-wagon-wagon Lokomotywa-lokomotywa-wagon-wagon	3.5
4	from Veresk to Dowgol (southward) z Veresk do Dowgol (na południe)	Diesel-diesel-wagon-wagon Lokomotywa-lokomotywa-wagon-wagon	3.9

4.2. OBCIĄŻENIE DYNAMICZNE

Podczas badań mostu pod obciążeniem dynamicznym pociąg testowy o opisanym składzie odbywał przejazdy w obie strony z różnymi prędkościami [24], a zamontowane na konstrukcji czujniki rejestrowały jej odpowiedź na obciążenie. W niemal wszystkich przypadkach częstotliwość próbkowania ustalono na 1 kHz i zastosowano cyfrowy filtr dolnoprzepustowy. Należy zaznaczyć, że wyniki zarejestrowano również dla przejeżdżających przez most pociągów towarowych i osobowych, a ich obciążenie oraz prędkość szacowano na podstawie zamontowanych na moście tensometrów. Specyfikacje badań dynamicznych przedstawiono w Tabl. 3, 4 i 5.

4.2. DYNAMIC LOADING

During dynamic loading, the test train with the described arrangement was driven in two round-trip routes at varying speeds [24], and the installed sensors recorded the response of the structure to the loading. In almost all the tests, the sampling frequency was set to 1 kHz and a digital low-pass filter was used. It should be emphasized that the results were also recorded for the passing freight and passenger trains, and their axial load and speed were estimated using the output of the installed strain gauges. The specifications of the tests are shown in Tables 3, 4, and 5.

Table 3. Characteristics of the dynamic tests (test train moving from Dowgol to Veresk)

Tablica 3. Charakterystyka badań dynamicznych (pociąg testowy jadący z Dowgol do Veresk)

Test No. Nr badania	Type of fleet Rodzaj taboru	Arrangement of the passing train Skład przejeżdżającego pociągu	Speed [km/h] Prędkość
1	Test train (2 diesels + 2 wagons) Pociąg testowy (2 lokomotywy + 2 wagony)	Wagon-wagon-diesel-diesel Wagon-wagon-lokomotywa-lokomotywa	46.2
2		Diesel-diesel-wagon-wagon Lokomotywa-lokomotywa-wagon-wagon	47.4
3		Wagon-wagon-diesel-diesel Wagon-wagon-lokomotywa-lokomotywa	48.3
4		Wagon-wagon-diesel-diesel Wagon-wagon-lokomotywa-lokomotywa	49.1
5		Wagon-wagon-diesel-diesel Wagon-wagon-lokomotywa-lokomotywa	50.2
6		Wagon-wagon-diesel-diesel Wagon-wagon-lokomotywa-lokomotywa	50.3
7		Diesel-diesel-wagon-wagon Lokomotywa-lokomotywa-wagon-wagon	50.7
8		Wagon-wagon-diesel-diesel Wagon-wagon-lokomotywa-lokomotywa	57.3
9		Wagon-wagon-diesel-diesel Wagon-wagon-lokomotywa-lokomotywa	61.7

Table 4. Characteristics of the dynamic tests (test train moving from Veresk to Dowgol)
 Tablica 4. Charakterystyka badań dynamicznych (pociąg testowy jadący z Veresk do Dowgol)

Test No. Nr badania	Type of fleet Rodzaj taboru	Arrangement of the passing train Skład przejeżdżającego pociągu	Speed [km/h] Prędkość
1	Test train (2 diesels + 2 wagons) Pociąg testowy (2 lokomotywy + 2 wagony)	Diesel-diesel-wagon-wagon Lokomotywa-lokomotywa-wagon-wagon	35.2
2		Wagon-wagon-diesel-diesel Wagon-wagon-lokomotywa-lokomotywa	42.9
3		Diesel-diesel-wagon-wagon Lokomotywa-lokomotywa-wagon-wagon	50.8
4		Diesel-diesel-wagon-wagon Lokomotywa-lokomotywa-wagon-wagon	51.9
5		Wagon-wagon-diesel-diesel Wagon-wagon-lokomotywa-lokomotywa	52.1
6		Diesel-diesel-wagon-wagon Lokomotywa-lokomotywa-wagon-wagon	52.3
7		Diesel-diesel-wagon-wagon Lokomotywa-lokomotywa-wagon-wagon	52.8
8		Diesel-diesel-wagon-wagon Lokomotywa-lokomotywa-wagon-wagon	53.9
9		Diesel-diesel-wagon-wagon Lokomotywa-lokomotywa-wagon-wagon	54.1

Table 5. Specifications of the dynamic tests – other trains
 Tablica 5. Charakterystyka badań dynamicznych – inne pociągi

Test No. Nr badania	Type of fleet Rodzaj taboru	Direction of movement Trasa (kierunek) jazdy	Arrangement of the passing train Skład przejeżdżającego pociągu	Speed [km/h] Prędkość
1	Freight train Pociąg towarowy	from Dowgol to Veresk z Dowgol do Veresk	Diesel-diesel-wagon Lokomotywa-lokomotywa-wagon	38
2		from Veresk to Dowgol z Veresk do Dowgol	Diesel-diesel-wagon Lokomotywa-lokomotywa-wagon	43
3	Passenger train Pociąg osobowy	from Dowgol to Veresk z Dowgol do Veresk	Diesel-carriage Lokomotywa-wagon	56

5. MODELOWANIE KONSTRUKCJI MOSTU VERESK W PROGRAMIE ABAQUS

5.1. UWAGI OGÓLNE

Szczegółowe modelowanie konstrukcji mostu Veresk zrealizowano w programie ABAQUS 6.11. Wyniki analizy modelu porównano z wynikami badań terenowych, celem weryfikacji modelu oraz przyjętych warunków obciążenia. Jako że most Veresk wykonany jest z bloków betonowych bez zbrojenia, a wszystkie łuki przenoszą obciążenia wspólnie z łukiem głównym (rozpiętość 66 metrów), konstrukcja pracuje w skomplikowany sposób. W związku z tym przygotowano model 3D konstrukcji w oprogramowaniu ABAQUS 6.11. Zastosowano elementy Solid typu C3D8R. Wytrzymałość bloków betonu wynosiła 32 MPa. Moduł sprężystości bloczków i zaprawy wynosił 25 GPa. Co oczywiste, właściwości samego tłuczni nawierzchni kolejowej nie mają większego wpływu na ostateczne wyniki – ze względu na znaczną różnicę między jego

5. VERESK BRIDGE MODELLING USING ABAQUS

5.1. GENERAL REMARKS

The detailed modelling of the Veresk Bridge was conducted using the ABAQUS 6.11 program. The findings of this modelling were compared with the results of the field tests in order to validate the bridge model and its loading conditions. Since the Veresk Bridge is made of unreinforced concrete blocks and all the arches, together with the main arch (66 meters span), perform the load-bearing function in connection with each other, the behavior of the structure is complex. Therefore, a 3D model of the structure was prepared using the potent finite element program ABAQUS 6.11. The used Solid elements belong to the C3D8R type. The strength of the concrete blocks is equal to 32 MPa. The total modulus of elasticity of the block and mortar is 25 GPa. Obviously, the characteristics of the ballast material will not have

modułem sprężystości a modułem sprężystości betonu – jednakże uwzględnienie warstwy tłucznia w modelu znacznie ułatwia właściwe rozłożenie obciążeń. Płyty betonowe odzwierciedlające w modelu pomost oraz warstwę podsypki przedstawiono na Rys. 4 i 5.

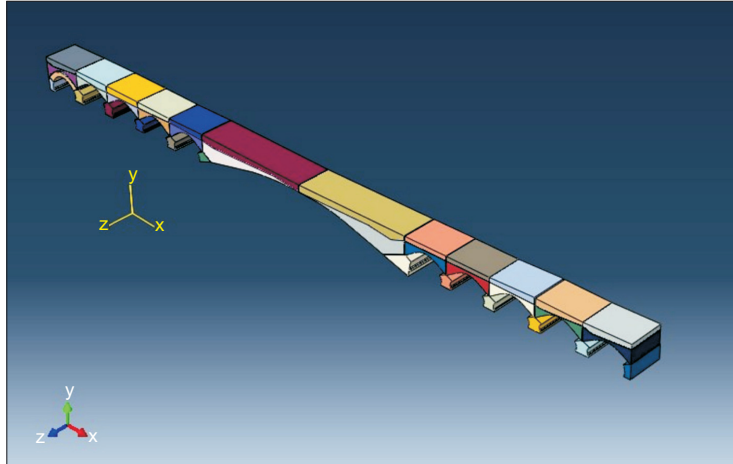


Fig. 4. Concrete filling on the bridge deck
Rys. 4. Odzwierciedlenie w modelu płyt betonowych na pomoście

5.2. ANALIZA MODALNA MOSTU

We wstępnych analizach zastosowano początkowo wymiary siatki 70 cm, 50 cm, 40 cm oraz 30 cm, celem określenia optymalnego rozmiaru siatki (Rys. 6). Na podstawie wyników stwierdzono, że optymalna wartość wynosi 40 cm. Model poddano dynamicznej analizie modalnej; celem było zweryfikowanie odpowiedzi dynamicznych oraz zidentyfikowanie częstotliwości drgań. Analizę przeprowadzono, stosując obciążenia opisane powyżej. Dużą uwagę poświęcono precyzyjnemu określeniu wartości parametrów materiałów, jako że mają one niezwykle istotny wpływ na wyniki otrzymywane z analiz prowadzonych na modelach MES. Wyniki uzyskane z oprogramowania są bardzo wrażliwe na zmiany wartości parametrów materiałowych zastosowanych w modelowaniu. Łuki są wykonane z materiałów budowlanych o dokładnie określonych właściwościach, a pomost – z niezbrojonych bloków betonowych. Biorąc pod uwagę oczekiwaną pracę modelowanych elementów, do budowy modelu zastosowano wszechstronny element Solid, a dokładniej – Solid-C3DSR, który był najwłaściwszym wyborem, biorąc pod uwagę pracę konstrukcji oraz istniejące warunki. W Tabl. 6 przedstawiono charakterystykę materiałów zastosowanych w analizie. Na Rys. 7 pokazano punkty pomiarowe na przęsłach mostu.

much of an impact on the ultimate conclusions due to the significant difference between their modulus of elasticity and that of concrete, but their incorporation greatly aids proper load distribution. The concrete filling for the bridge deck and the layer of ballast are shown in Figs 4 and 5.

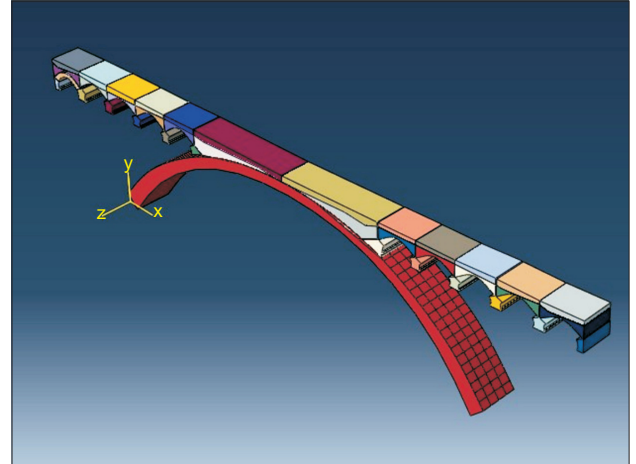


Fig. 5. Overview of the model of the bridge
Rys. 5. Widok ogólny modelu mostu

5.2. BRIDGE MODAL ANALYSIS

Mesh dimensions of 70, 50, 40, and 30 cm were initially employed in the preliminary analysis procedure in order to determine the ideal mesh size (Fig. 6). The results showed that the optimum mesh size equaled 40 cm. The type of analysis selected for this model is modal dynamic analysis. The purpose of this analysis is to verify the dynamic responses and find the response frequencies. This analysis process was performed based on the loading that was mentioned earlier. Considerable effort was devoted to precise specification of the values of material characteristics, because the type of material properties is extremely significant in software modelling analyses. The results obtained from the software are very sensitive to changes in the values of the properties of the materials used in the modelling process. The arches are made of building materials of precisely specified characteristics and the bridge deck itself is made of unreinforced concrete blocks. According to the desired performance of the modeled elements, the efficient Solid element was used in the modeling process. More explicitly, the Solid-C3DSR element was the most suitable element for the proper performance of the elements used in the modelling process, taking into account the existing conditions. Table 6 shows the characteristics of the materials used in the analysis and Fig. 7 shows loading stations on spans.

Table 6. Characteristics of the materials used in the analysis
 Tablica 6. Charakterystyka materiałów zastosowanych w analizie

Material Materiał	Density (mass per unit volume) Gęstość [kg/m ³]	Poisson's coefficient [-] Współczynnik Poissona	Modulus of elasticity [GPa] Moduł sprężystości	Compressive strength [MPa] Wytrzymałość na ściskanie
Concrete of arches and foundations Beton łuków i fundamentów	2400	0.167	25	25
Filler concrete Beton na pomoście	2400	0.167	19.3	15
Ballast / Tłuczeń	2600	0.200	0.300	—

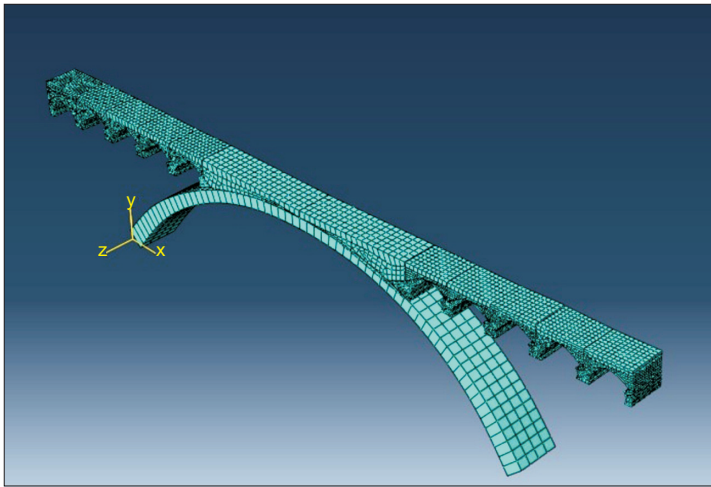


Fig. 6. Overview of the bridge model meshing
 Rys. 6. Ogólny widok modelowej siatki elementów skończonych

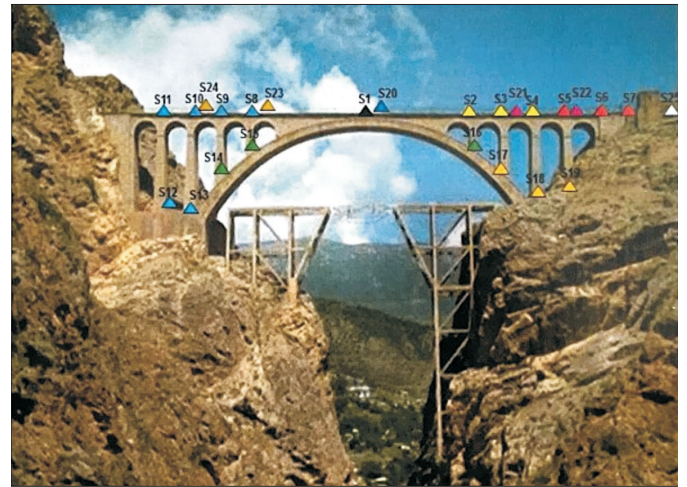


Fig. 7. Bridge and loading stations on spans
 Rys. 7. Widok mostu z naniesionymi punktami pomiarowymi

Ze względu na ograniczoną liczbę akcelerometrów rozpatrzone zostanie w modelowaniu jedynie pięć punktów określających postać drgań własnych (Tabl. 7); tym samym częstotliwość oraz porównywalną postać drgań należy rozpatrywać ze świadomością ograniczonej dokładności odwzorowania graficznego.

Z analizy Rys. 8a (część górna) wynika, że północne i południowe części mostu drgają z częstotliwością 3,3 Hz oraz przesunięciem fazowym 180 stopni, co jest zachowaniem podobnym do drugiej postaci drgań uzyskanej z modelu dla 3,16 Hz – Rys. 8b (część dolna rysunku). Od częstotliwości próbkowania zależy jednak obraz sygnałów w dziedzinie częstotliwości oraz gładkość wykresu – może to skutkować odmiennymi odczytami maksimów lokalnych w różnych badaniach.

Z Rys. 9a (część górna) wynika, że północne i południowe części mostu drgają z częstotliwością 5 Hz w tych samych kierunkach (z przesunięciem fazowym 0 stopni), co jest zachowaniem podobnym do czwartej postaci drgań uzyskanej z modelu dla 5,14 Hz – Rys. 9b (część dolna).

Given the restricted number of accelerometers, only 5 points of the mode shape will be provided (Table 7), and the modal frequency and comparable mode shape should be evaluated with limited graphic accuracy.

According to Fig. 8a (top part), it can be said that the northern and southern parts of the bridge oscillate at the frequency of 3.3 Hz with phase difference of 180 degrees (opposite to each other), which is similar to the second mode of 3,16 Hz obtained from the modelling – Rys. 8b (bottom part). The longer the change in time, the finer the frequency steps in the frequency spectrum signal and the smoother the spectrum graph, which may cause changes in peak frequency readings in different experiments.

As visible in Fig. 9a (top part), the northern and southern parts of the bridge oscillate in the same direction at the frequency of 5 Hz (with zero degree phase difference), which is similar to the fourth mode of 5.14 Hz obtained from the modelling in Fig. 9b (bottom part).

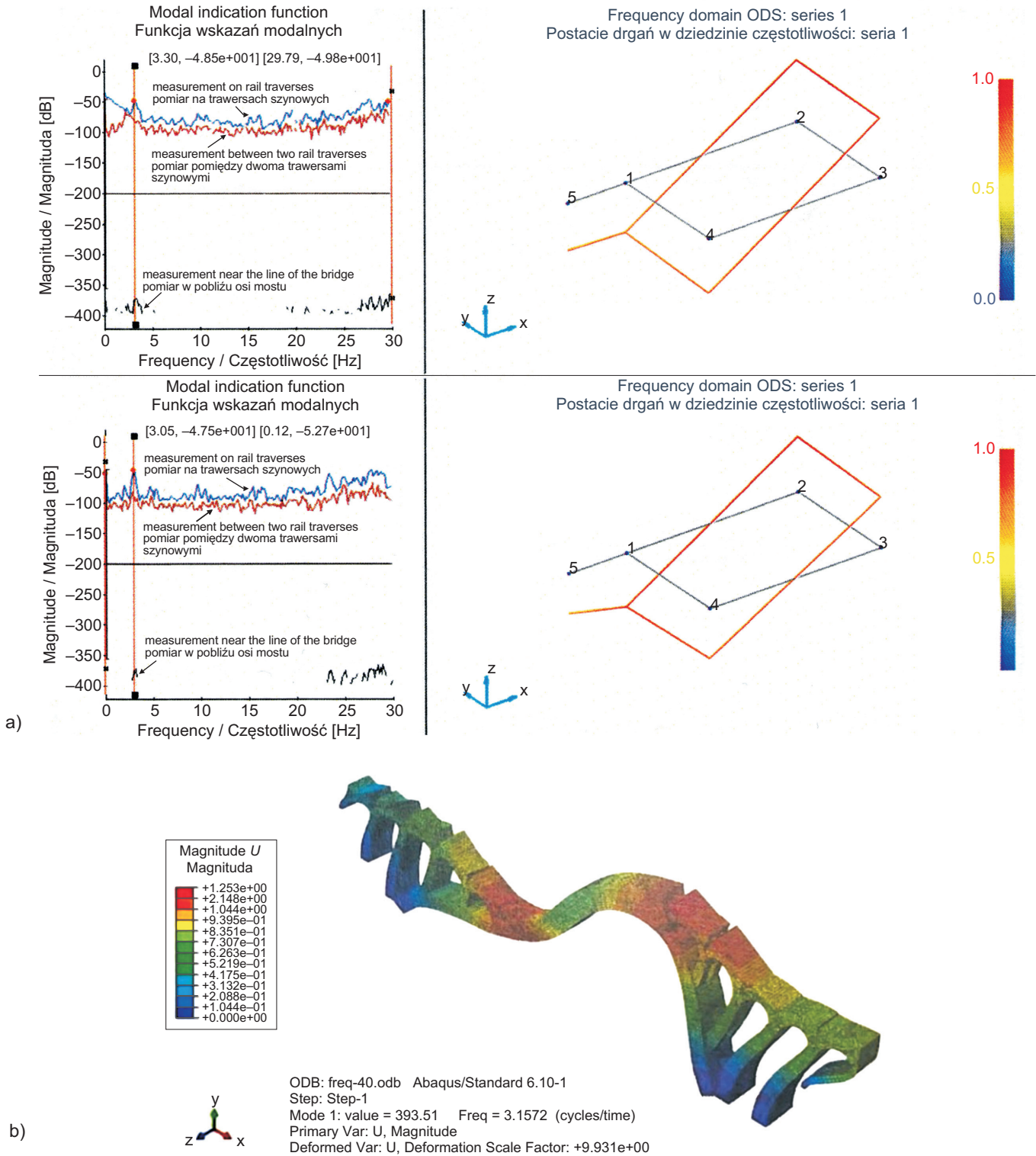


Fig. 8. Comparison of the oscillation shape of the second mode from the analysis of precision instrument measurements (top part – a) and ABAQUS (bottom part – a)

Rys. 8. Porównanie drugiej postaci drgań otrzymanej z analizy pomiarów wykonanych przyrządami precyzyjnymi (górną część – a) oraz z analizy w programie ABAQUS (dolną część – b)

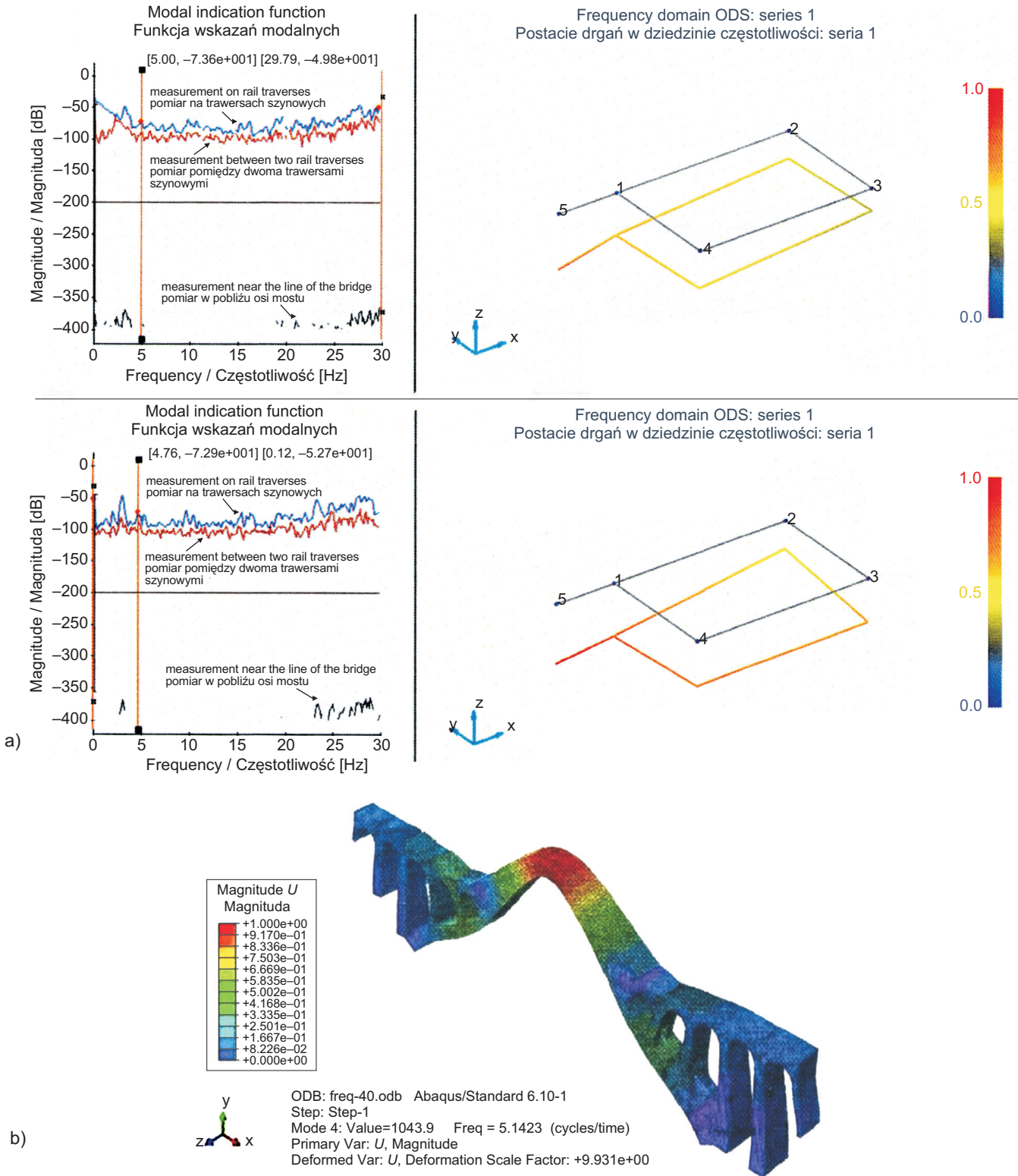


Fig. 9. Comparison of the oscillating shape of the fourth mode from the analysis of precision instrument measurements (top part – a) and ABAQUS (bottom part – b)

Rys. 9. Porównanie czwartej postaci drgań otrzymanej z analizy pomiarów wykonanych przyrządami precyzyjnymi (górną część – a) oraz z analizy w programie ABAQUS (dolną część – b)

Table 7. The frequency values of the first five modes obtained from the ABAQUS software for the model mesh dimension of 40 cm

Tablica 7. Częstotliwości pierwszych pięciu postaci drgań własnych uzyskane z modelowania w oprogramowaniu ABAQUS przy rozmiarze modelowej siatki 40 cm

Mode number Numer postaci	First mode Pierwsza postać	Second mode Druga postać	Third mode Trzecia postać	Fourth mode Czwarta postać	Fifth mode Piąta postać
Frequency [Hz] Częstotliwość	2.1522	3.1572	4.1229	5.1423	5.8381

5.3. ANALIZA NA PODSTAWIE OBCIĄŻEŃ STAŁYCH

Konstrukcję mostu przeanalizowano najpierw pod obciążeniami stałymi, a następnie zweryfikowano jej odpowiedź na podstawie obciążeń ruchomych. Wartości przemieszczeń i naprężeń wywołane obciążeniami stałymi, uzyskane w ramach przeprowadzonych analiz przedstawiono w Tabl. 8.

Table 8. Values of displacements and longitudinal/vertical stresses of the structure under dead load

Tablica 8. Wartości przemieszczeń oraz naprężeń poziomych/pionowych pod obciążeniem stałym

Joint / Punkt pomiarowy	Displacements of the structure under dead load [mm] Przemieszczenia konstrukcji pod obciążeniem stałym		Stresses under dead load [MPa] Naprężenia pod obciążeniem stałym	
	U1 (longitudinal / poziome)	U2 (vertical / pionowe)	σ_{11}	σ_{22}
Under the first column Pod pierwszą kolumną	0.138	-0.633	-0.7	-0.45
Under the second column Pod drugą kolumną	0.487	-1.736	-0.95	-0.35
Under the third column Pod trzecią kolumną	0.653	-2.845	-2	-1.1
The vertex of the first sub-arc W kluczu pierwszego łuku bocznego	0.925	-1.258	-0.35	-0.01
The vertex of the second sub-arc W kluczu drugiego łuku bocznego	1.023	-2.270	-0.25	-0.025
The top of the main arch of the bridge W kluczu łuku głównego	0.226	-6.483	-0.35	-0.05
Quarter-span section Przekrój w 1/4 rozpiętości przęsła	0.813	-4.832	-1.2	-0.07

5.4. ANALIZA POD OBCIĄŻENIEM RUCHOMYM

Modelowanie pod obciążeniem ruchomym przeprowadzono dla obciążenia ruchomego 25 ton, a odpowiedź konstrukcji pod trzema wspomnianymi niżej rodzajami obciążeń uzyskano jako wyniki z obliczeń. Wyniki uzyskane na tym etapie w obliczeniach z użyciem oprogramowania dla trzech różnych rodzajów obciążeń przedstawiono w Tabl. 9.

Rodzaje obciążeń były następujące:

1. Obciążenie ruchome pierwszego rodzaju składało się z dwóch lokomotyw;
2. Obciążenie ruchome drugiego rodzaju składało się z dwóch lokomotyw i dwóch wagonów towarowych;

5.3. ANALYSIS BASED ON DEAD LOAD

First, the bridge structure was analyzed under dead load, and then the response values were verified based on live loads. The values of deformations and stresses created under dead load of the structure according to the performed analyses are shown in Table 8.

5.4. ANALYSIS BASED ON THE LIVE LOAD OF THE BRIDGE

Live load modelling was performed for a moving load of 25 tons, and the responses of the structure under the three mentioned types of loading were obtained using the software outputs. At this stage, using the analysis of dynamic time history in the software, the results of the analysis of the three loadings are displayed in Table 9.

The types of loading are as follows:

1. The first type of live load includes two locomotives;
2. The second live load includes two locomotives and two freight wagons;

3. Trzecie obciążenie ruchome było zgodne z Przepisami nr 139: według dokumentu współczynnik dynamiczny wynosi 1,08 dla łuku głównego oraz 1,67 dla łuków bocznych.

Omówiono również wartości naprężeń wynikające z trzech analizowanych obciążeń. W Iranie żadna oficjalna norma nie reguluje kwestii mostów łukowych; jedyną oficjalną publikacją normową określającą dopuszczalne naprężenia w materiałach konstrukcyjnych są Przepisy techniczne i wykonawcze Republiki Iranu nr 308: „Wytyczne projektowania murów oporowych” [25]. Celem określenia dopuszczalnych naprężeń, przyjęto wartości naprężeń ściskających, rozciągających i ścinających dopuszczone w Przepisach nr 308 (odpowiednio 11,25 MPa, 0,68 MPa oraz 0,50 MPa). Badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzone na próbkach cylindrycznych odwierconych z bloków betonowych na moście wykazały, że średnia wytrzymałość betonu na ściskanie wynosiła 32 MPa. W celu uwzględnienia wpływu obecności zaprawy między blokami, biorąc pod uwagę ciągłość modelu, założono wynikowy wspólny moduł sprężystości dla betonu i zaprawy, wynoszący 25 GPa. Zgodnie z Przepisami nr 308, dopuszczalne wartości naprężeń dla $f'_c = 25$ MPa są następujące:

1. Dopuszczalne naprężenia ściskające: 11,25 MPa;
2. Dopuszczalne naprężenia rozciągające: 0,68 MPa;
3. Dopuszczalne naprężenia ścinające: 0,5 MPa.

3. The live load of the standard train of Regulations No.139: according to the document, the impact coefficient of 1.08 is considered in the main arch and the impact coefficient of 1.67 in the secondary arch.

The values of stresses resulting from the three types of loading discussed were also investigated. There is no official publication for arched bridges in Iran and the only official standard publication that determines the allowable stresses in building materials is Regulations of the technical and executive system of the Islamic Republic of Iran No. 308 “Guideline for Design of Retaining Walls” [25]. To determine the allowable stresses, the values of permissible compressive, tensile and shear stresses stated in Regulations No. 308 (11.25, 0.68 and 0.50 MPa, respectively) were used. The results of testing of the compressive strength of cylindrical specimens cored from unreinforced concrete blocks of the bridge showed that the average strength of the concrete is 32 MPa. In order to consider the effect of mortar between the blocks and according to continuous numerical modelling, the total elasticity coefficient of the block and mortar was assumed as 25 GPa. According to the Regulations No (308), the values allowed for $f'_c = 25$ MPa are as follows:

1. Allowable compressive stress: 11.25 MPa;;
2. Allowable tensile stress: 0.68 MPa;
3. Permissible shear stress: 0.5 MPa.

Table 9. Values of longitudinal and vertical deformations of the structure under live load
Tablica 9. Wartości deformacji poziomych i pionowych konstrukcji pod obciążeniem ruchomym

Joint / Punkt pomiarowy	Deformations of the structure under live load / Deformacje konstrukcji pod obciążeniem ruchomym					
	for first type loading dla pierwszego rodzaju obciążenia		for second type loading dla drugiego rodzaju obciążenia		for third type loading dla trzeciego rodzaju obciążenia	
	longitudinal poziome $U1$ [mm]	vertical pionowe $U2$ [mm]	longitudinal poziome $U1$ [mm]	vertical pionowe $U2$ [mm]	longitudinal poziome $U1$ [mm]	vertical pionowe $U2$ [mm]
Under the first column Pod pierwszą kolumną	-0.33	-0.18	-0.33	-0.18	-0.29	0.07
Under the second column Pod drugą kolumną	-0.56	-0.57	-0.6	-0.56	-0.35	-0.39
Under the third column Pod trzecią kolumną	-0.58	-0.97	-0.63	-0.96	0.33	-0.94
The vertex of the first sub-arc W kluczu pierwszego łuku bocznego	0.67	-0.48	0.65	-0.47	0.76	-0.64
The vertex of the second sub-arc W kluczu drugiego łuku bocznego	0.8	-0.81	0.78	-0.81	1.16	-1.52
The top of the main arch of the bridge W kluczu łuku głównego	0.54	-1.85	0.53	-1.93	0.34	-3.46
Quarter-span section Przekrój w 1/4 rozpiętości przęsła	0.682	-1.09	0.67	-1.08	0.41	-1.27

Wartości naprężeń uzyskane z analizy przedstawiono w Tabl. 10 i 11.

Stress values obtained from the analysis are shown in Tables 10 and 11.

Table 10. Maximum and minimum principal stress values σ_p [MPa] at the lower points of the structure under live and dead load

Tablica 10. Maksymalne i minimalne wartości naprężeń głównych σ_p [MPa] w niższych punktach konstrukcji pod obciążeniami ruchomymi i stałymi

Joint / Punkt pomiarowy	Principal stresses at the lower points of the structure under live and dead load Naprężenia główne w niższych punktach konstrukcji pod obciążeniami ruchomymi i stałymi					
	for first type loading dla pierwszego rodzaju obciążenia		for second type loading dla drugiego rodzaju obciążenia		for third type loading dla trzeciego rodzaju obciążenia	
	σ_p [MPa]		σ_p [MPa]		σ_p [MPa]	
	max	min	max	min	max	min
Under the first column Pod pierwszą kolumną	0.041	-1.61	0.041	-1.94	0.046	-2.15
Under the second column Pod drugą kolumną	0.066	-1.93	0.066	-1.99	0.069	-2.06
Under the third column Pod trzecią kolumną	0.082	-1.81	0.083	-1.83	0.078	-2.06
The vertex of the first sub-arc W kluczu pierwszego łuku bocznego	0.81	-0.01	0.81	-0.01	0.89	-0.02
The vertex of the second sub-arc W kluczu drugiego łuku bocznego	0.1	-0.41	0.1	-0.41	0.29	-0.15
The top of the main arch of the bridge W kluczu łuku głównego	0.11	-0.42	0.11	-0.4	0.44	-0.05
Quarter-span section Przekrój w 1/4 rozpiętości przęsła	-0.001	-2.1	-0.001	-2.12	0.002	-2.4

Table 11. Maximum shear stress values τ_{max} at the lower points of the structure under live and dead load

Tablica 11. Maksymalne wartości naprężeń ścinających τ_{max} w niższych punktach konstrukcji pod obciążeniami ruchomymi i stałymi

Joint / Punkt pomiarowy	Shear stresses at the lower points of the structure under live and dead load Naprężenia ścinające w niższych punktach konstrukcji pod obciążeniami ruchomymi i stałymi		
	for first type loading dla pierwszego rodzaju obciążenia	for second type loading dla drugiego rodzaju obciążenia	for third type loading dla trzeciego rodzaju obciążenia
	τ_{max} [MPa]		
	τ_{max} [MPa]	τ_{max} [MPa]	τ_{max} [MPa]
Under the first column Pod pierwszą kolumną	0.84	0.84	1.03
Under the second column Pod drugą kolumną	0.79	0.81	1.05
Under the third column Pod trzecią kolumną	0.66	0.67	0.93
The vertex of the first sub-arc W kluczu pierwszego łuku bocznego	0.17	0.17	0.27
The vertex of the second sub-arc W kluczu drugiego łuku bocznego	0.14	0.14	0.1
The top of the main arch of the bridge W kluczu łuku głównego	0.17	0.17	0.06
Quarter-span section Przekrój w 1/4 rozpiętości przęsła	0.83	0.83	1.09

Jak widać, dopuszczalne naprężenia ściskające były stosunkowo wysokie, nie należy się więc spodziewać trudności w tym względzie; z kolei dopuszczalne naprężenia rozciągające

As can be observed, the permissible compressive stress was relatively high, and no difficulties should be expected in this regard; nevertheless, the allowable tensile and shear

i ścinające mogą okazać się problematyczne. Naprężenia rozciągające w łuku głównym konstrukcji – tylko na górze pierwszego łuku bocznego – określone dla obecnego obciążenia użytkowego oraz dla obciążenia z Przepisów nr 139 są większe od wartości dopuszczalnych wg Przepisów nr 308 – odpowiednio o 20% i 30%. Stwierdzony podczas oceny wizualnej brak pęknięć w tych przekrojach świadczy o tym, że rzeczywiste dopuszczalne naprężenia są wyższe od założonych, a zatem przekroczenie zakładanych wartości nie jest w tym przypadku niepokojące. Ponadto ewentualne wystąpienie pęknięcia w kluczu łuku nie oznacza natychmiastowej utraty nośności – konstrukcja będzie wykazywała zdolność do przenoszenia obciążeń, dopóki nie powstanie mechanizm trójprzegubowy. Naprężenia ścinające w łuku głównym pod pierwszą, drugą i trzecią kolumną uzyskane dla obecnego obciążenia użytkowego oraz dla obciążenia projektowego z Przepisów nr 139 są większe od wartości dopuszczalnych w Przepisach nr 308 o – odpowiednio – 70% oraz 120%. Brak spękań w tych przekrojach – stwierdzony podczas oceny wizualnej w terenie – świadczy, że rzeczywiste dopuszczalne naprężenia ścinające są większe od założonej wartości, a obecne obciążenia użytkowe nie budzą niepokojów w kontekście naprężeń ścinających. Gdyby jednak doszło do ewentualnego wzrostu obciążeń, należałoby zastosować niezbędne środki, aby wzmocnić łuk główny pod wymienionymi kolumnami. Powyższe spostrzeżenia wskazują, że określone wartości nie są niepokojące.

6. ANALIZA Z ZASTOSOWANIEM TRANSFORMACJI FALKOWEJ

Na podstawie wyników uzyskanych z oprogramowania ABAQUS przeprowadzono analizę wrażliwości z zastosowaniem dyskretnej transformacji falkowej. Na Rys. 10 i 11 przedstawiono przykłady wyników uzyskanych z analiz opartych na zastosowaniu transformacji falkowej.

Jak widać na Rys. 10b, wyniki uzyskane z czujników zamontowanych pośrodku przęsła (zastosowano dwa czujniki DCDT) wskazują, że przemieszczenie pionowe (w niektórych przypadkach prowadzące do lekkiego podniesienia) rozpoczyna się, zanim pierwsza oś przejedzie przez przekrój. Kiedy pierwsza oś dotrze do przekroju, łuk główny przemieszcza się w dół. Po przejechaniu pociągu i odciążeniu łuk wraca do pierwotnego położenia. Wyniki te są zgodne z wynikami analiz opartych na transformacji falkowej (Rys. 10a).

Na Rys. 11 pokazane są identyczne wyniki jak na Rys. 10 – z tą różnicą, że na czele pociągu poruszała się lokomotywa spalinowa. Porównanie Rys. 10 i 11 wskazuje, że gdy lokomotywa jechała na czele, redukcja obciążenia następująca w momencie opuszczenia przekroju przez lokomotywę i najechania wagonu

stress may prove a concern. Tensile stresses in the main arch of the structure only at the top of the first sub-arch determined for the current operating load and for the load from publication 139 are greater than the values permitted in publication 308 by 20% and 30%, respectively. The absence of cracks in these sections, based on visual inspection, shows that the actual allowable tensile stress is higher than the considered value, and there is no need for concern in this aspect. In addition, occurrence of a crack in the key of an arch does not mean the end of its load-bearing capacity, as the structure will display load-bearing capacity until the formation of a three-joint mechanism. The shear stresses of the main arch under the first, second, and third columns obtained under the current operating load and under the design load from Regulations No. 139 are greater than the values permitted in Regulations No. 308 by 70% and 120%, respectively. The absence of cracks in these sections, based on visual inspection, shows that the actual allowable shear stress is higher than the considered value, and there is no concern for the current operating load. But with the potential increase in the axial load, necessary measures should be taken to strengthen the main arch under the column. The findings indicate that the determined values are not concerning.

6. ANALYSIS WITH A WAVELET FUNCTION

According to the outputs of the ABAQUS software, sensitivity analysis was performed on the bridge using a discrete wavelet function. Examples of the results obtained from the wavelet function model are presented in Figs 10 and 11.

As visible in Fig. 10b, the results obtained from the sensor installed in the middle of the opening (measured by two DCDT devices) showed that the vertical deformation (at this point with a small elevation in some cases) starts before the arrival of the first axis. When the first axis arrives, the main arch moves down. It returns to its original position after the train has passed and the load has been removed. This result is in line with the analysis based on the wavelet function (Fig. 10a).

Fig. 11 shows identical results as Fig. 10 – with the exception that the diesel locomotive was in the lead of the train. Comparison of Figs 10 and 11 indicates that when the diesel was in the lead, the reduction in the pressure from the maximum amount (when the diesel passes) to the pressure when the wagon passes, did not result in any noticeable change in the vertical displacement of the bridge. During the departure of the train, the deformation

nie spowodowała zauważalnych zmian w przemieszczeniach pionowych mostu. Po przejechaniu pociągu przez przekrój przemieszczenie stopniowo wracało do zera. Jak wspomniano wcześniej, wyniki uzyskane z czujników DCDT w każdym badaniu były wyrażone jako maksymalne parametry przemieszczenia. Sensory te zastosowano w związku z ograniczeniami w wykorzystaniu konwencjonalnych czujników przemieszczenia, takich jak LDVT.

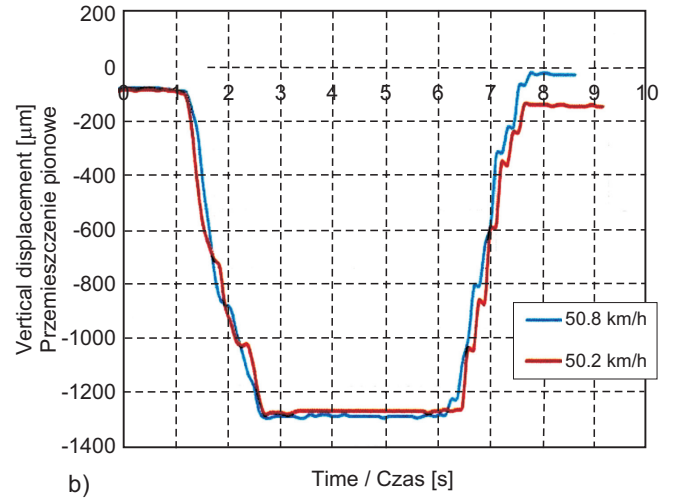
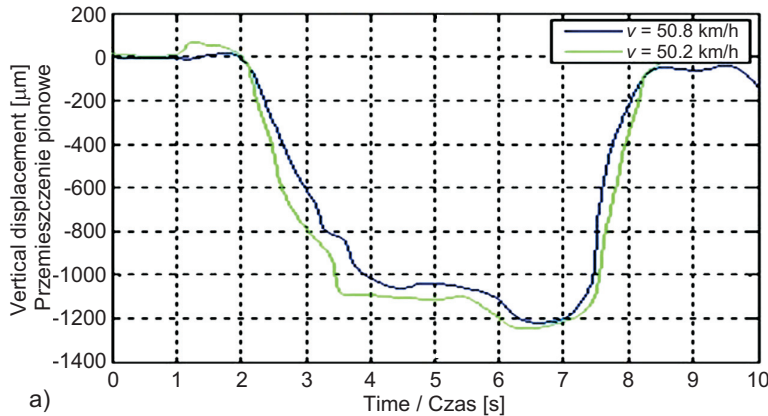


Fig. 10. Comparison of the values of vertical displacement of the bridge in the middle of the span (with the wagon leading) for two states, for $v = 50.8$ km/h and $v = 50.2$ km/h, using the wavelet function (a) and precision instruments (b)

Rys. 10. Porównanie wartości przemieszczenia pionowego pośrodku przęsła (przy wagonie jadącym z przodu pociągu) uzyskanych dla dwóch prędkości: $v = 50,8$ km/h oraz $v = 50,2$ km/h – z zastosowaniem transformacji falkowej (a) i przyrządów pomiarowych (b)

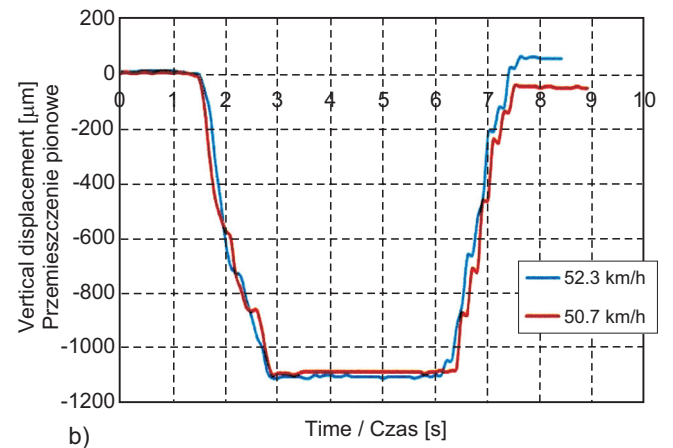
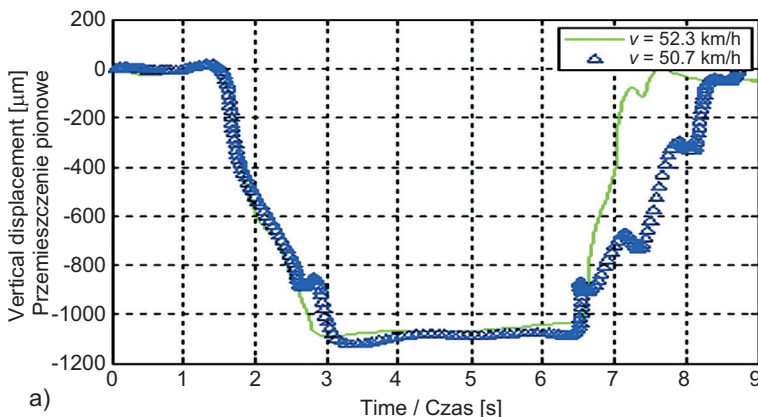


Fig. 11. Comparison of the values of vertical displacement of the bridge in the middle of the span (with diesel leading) for two modes, for $v = 52.3$ km/h and $v = 50.7$ km/h, using the wavelet function (a) and precision instruments (b)

Rys. 11. Porównanie wartości przemieszczenia pionowego pośrodku przęsła (przy lokomotywie jadącej z przodu pociągu) uzyskanych dla dwóch prędkości: $v = 52,3$ km/h oraz $v = 50,7$ km/h – z zastosowaniem transformacji falkowej (a) i przyrządów pomiarowych (b)

7. WNIOSKI

Celem przedstawionej pracy było określenie ogólnego stanu mostu Veresk, który został oddany do eksploatacji ponad 90 lat temu. W związku z tym dokonano porównania wyników

gradually decreased to zero. As mentioned earlier, the results obtained from DCDT sensors for each test were expressed with maximum displacement parameters. These sensors were used due to the limitations in the use of conventional displacement sensors such as LDVT.

7. CONCLUSIONS

The aim of the presented research was to identify the overall health of the Veresk Bridge, which had been in service for more than 90 years. For this purpose, the results of

uzyskanych z precyzyjnych przyrządów pomiarowych oraz z modelowania z zastosowaniem programu ABAQUS i transformacji falkowej.

Na podstawie analizy wyników wykazano, że naprężenia rozciągające w łuku głównym – tylko na górze pierwszego łuku bocznego – były dla obciążenia zdefiniowanego w Przepisach nr 139 o 30% wyższe od wartości dopuszczalnej określonej w Przepisach nr 308. Przy obciążeniach tego rodzaju należy uwzględnić warunki pracy konstrukcji i rozważyć jej naprawę oraz wzmocnienie celem zapewnienia trwałości. Ilości spękań w głównym łuku nie były alarmujące, biorąc pod uwagę wartości naprężeń rozciągających oraz wartości zatwierdzone w przepisach. Przy obecnym obciążeniu użytkowemu naprężenia ścinające w łuku głównym pod pierwszą, drugą i trzecią kolumną były o 70% wyższe niż dopuszczalne. O ile praca konstrukcji przy tym rodzaju obciążenia nie daje powodów do niepokoju, w przypadku wzrostu obciążenia należy naprawić i wzmocnić łuk główny pod kolumnami. W wyniku porównania wyników uzyskanych z przeprowadzonej analizy stwierdzono, że most ma obecnie nośność 20 ton, biorąc pod uwagę obciążenia stałe i ruchome. Dopiero, gdy obciążenie wzrośnie do 25 ton – tak jak podano w Przepisach nr 139 – naprężenia rozciągające w kluczu głównego łuku oraz pierwszego łuku bocznego przekroczą dozwolony limit, podobnie jak naprężenia ścinające w łuku pod pierwszą, drugą i trzecią kolumną. Porównanie wyników analizy opartej na zastosowaniu transformacji falkowej z wynikami pomiarów terenowych w zakresie przemieszczeń pionowych pośrodku przęsła wykazało zgodność wyników. Zgodnie z oczekiwaniami, deformacje otrzymane z analizy z zastosowaniem transformacji falkowej wskazują na lekkie podniesienie, a następnie obniżenie łuku w momencie nadjechania pociągu. Łuk wraca do pierwotnego położenia po usunięciu obciążenia. Wyniki przemieszczenia pionowego pośrodku przęsła były spójne, a fakt poruszania się lokomotywy lub wagonu na czele pociągu nie powodował zauważalnej zmiany w przemieszczeniach pionowych mostu.

Porównanie wyników analizy z zastosowaniem transformacji falkowej z wynikami pomiarów wskazuje, że modelowanie pracy mostu z zastosowaniem oprogramowania i transformacji falkowej daje wyniki zbliżone do rzeczywistości i akceptowalne; w związku z tym podejście to można zastosować również do problemów, które nie były rozpatrywane w badaniach terenowych.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

[1] Fabozzi S., Licata V., Autuori S., Bilotta E.: Prediction of the seismic behavior of an underground railway station and a tunnel in Napoli. *Underground Space*, **2**, 2, 2017, 45-61, DOI: 10.1016/j.undsp.2017.03.005

precision instruments and modelling with ABAQUS software and wavelet function were compared.

The results showed that tensile stresses in the main arch of the structure only at the top of the first sub-arch were higher by 30% than the permissible values given in publication 308 for the loading from publication 139. With this type of loading, the conditions, repairing and strengthening of the structure must be considered to ensure its durability. The quantity of cracks in the main arch was not concerning, based on the considered tension values and the values authorized in the regulations. Shear stresses in the main arch under the first, second, and third columns were 70% higher than permissible under the current operating load. While the performance of the structure in this type of loading was not a concern, if the axial load increases, the main arch must be strengthened and repaired under the columns. As a result of the comparison, the bridge currently has a load capacity of 20 tons. Only if the axial load increases to 25 tons, as given in publication 139, the tensile stresses in the key of the main arch and the first sub-arch and the shear stress of the arch in the section of the first, second and third sub-columns exceed the permissible limit. When the results of the wavelet function analysis were compared to the results of the field investigations regarding the change of the vertical shape of the bridge in the middle of the span, the results were consistent. As expected, the deformations obtained from the wavelet function analysis were accompanied by a small lift and then a downward movement as the train passed, with the arch returning to its original position when the load was removed. Regarding the vertical deformations of the bridge in the middle of the span, the results were physically consistent and the advance of the diesel or the wagon moving in the lead of the train did not create a noticeable change in the vertical displacement of the bridge.

Based on the comparison of the results obtained from the analysis using the wavelet function and the results of precision instruments, it was noted that the modelling of the bridge behavior with the wavelet function software is close to the reality and acceptable; therefore, it can be applied to other problems that have not been addressed in the field tests.

[2] Omenzetter P., Brownjohn J.M.W.: Application of time series analysis for bridge monitoring. *Smart Materials and Structures*, **15**, 1, 2006, 129-138, DOI: 10.1088/0964-1726/15/1/041

[3] Glisic B., Inaudi D.: *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*. John Wiley & Sons, Chichester, 2007

- [4] *Manouchehrian A., Cai M.*: Simulation of unstable rock failure under unloading conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, **53**, 1, 2016, 22-34, DOI: 10.1139/cgj-2015-0126
- [5] *Seyedpoor S.M., Yazdanpanah O.*: An efficient indicator for structural damage localization using the change of strain energy based on static noisy data. *Applied Mathematical Modelling*, **38**, 9-10, 2014, 2661-2672, DOI: 10.1016/j.apm.2013.10.072
- [6] *Yang H., Xu F., Ma J., Huang K.*: Strain modal-based damage identification method and its application to crane girder without original model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, **233**, 4, 2019, 1299-1311, DOI: 10.1177/0954406218769924
- [7] *Ma J., Kharboutly H., Benali A., Ben Amar F., Bouzit M.*: Joint angle estimation with accelerometers for dynamic postural analysis. *Journal of Biomechanics*, **48**, 13, 2015, 3616-3624, DOI: 10.1016/j.jbiomech.2015.08.008
- [8] *Sanchez J.C.*: Evaluation of Structural Damage Identification Methods Based on Dynamic Characteristics. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Puerto Rico, 2005
- [9] *Park B., Sohn H., Yeum C.M., Truong T.C.*: Laser ultrasonic imaging and damage detection for a rotating structure. *Structural Health Monitoring*, **12**, 5-6, 2013, 494-506, DOI: 10.1177/1475921713507100
- [10] *Kaloo M.R., Elbeltagi E., Hu J.W.*: Recent Advances of Structures Monitoring and Evaluation Using GPS-Time Series Monitoring Systems: A Review. *International Journal of Geo-Information*, **6**, 12, 2017, 382, DOI: 10.3390/ijgi6120382
- [11] *Abou-Galala M., Rabah M., Kaloo M., Zidan Z.M.*: Assessment of the accuracy and convergence period of Precise Point Positioning. *Mansoura Engineering Journal*, **57**, 2, 2016, 1-5, DOI: 10.21608/bfemu.2020.98819
- [12] *Yigit C.O., Gurlek E.*: Experimental testing of high-rate GNSS precise point positioning (PPP) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures. *Geomatics Natural Hazards and Risk*, **8**, 2, 2017, 893-904, DOI: 10.1080/19475705.2017.1284160
- [13] *Geng J., Meng X., Dodson A.H., Ge M., Teferle F.N.*: Rapid re-convergences to ambiguity-fixed solutions in precise point positioning. *Journal of Geodesy*, **84**, 12, 2010, 705-714, DOI: 10.1007/s00190-010-0404-4
- [14] *Ge M., Gendt G., Rothacher M.A., Shi C., Liu J.*: Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations. *Journal of Geodesy*, **82**, 7, 2008, 389-399, DOI: 10.1007/s00190-007-0187-4
- [15] *Li W., Kong Q., Ho S.C.M., Mo Y.L., Song G.*: Feasibility study of using smart aggregates as embedded acoustic emission sensors for health monitoring of concrete structures. *Smart Materials and Structures*, **25**, 11, 2016, ID article: 115031, DOI: 10.1088/0964-1726/25/11/115031
- [16] *Dehghani E., Zadeh M.N., Nabizadeh A.*: Evaluation of seismic behavior of railway bridges considering track-bridge interaction. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **18**, 1, 2019, 51-66, DOI: 10.7409/rabdim.019.004
- [17] *Xia Q., Cheng Y.Y., Zhang J., Zhu F.Q.*: In-service condition assessment of a long-span suspension bridge using temperature-induced strain data. *Journal of Bridge Engineering*, **22**, 3, 2017, ID article: a04016124, DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001003
- [18] *Ni Y.Q., Xia Y.X.*: Strain-based condition assessment of a suspension bridge instrumented with structural health monitoring system. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, **16**, 4, 2016, ID article: 1640027, DOI: 10.1142/S0219455416400277
- [19] *Khordmand S.A., Selajgeh M.*: Determining damage in bending plates by wavelet method and its severity. Master's thesis, Shahid Bahonar University, Kerman, 2018
- [20] *Haynes C., Todd M.*: Enhanced damage localization for complex structures through statistical modelling and sensor fusion. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **54-55**, 2015, 195-209, DOI: 10.1016/j.ymsp.2014.08.015
- [21] *Xiao C., Qu W.L., Tan D.M.*: An application of data fusion technology in structural health monitoring and damage identification. *Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, **5758**, 2005, 451-461, DOI: 10.1117/12.599783
- [22] *Bao X., Xia Z., Ye G.*: Numerical analysis on the seismic behavior of a large metro subway tunnel in liquefiable ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **6**, 6, 2017, 35-52, DOI: 10.1016/j.tust.2017.04.005
- [23] Regulations of the technical and executive system of the Islamic Republic of Iran No. 139 – Standard Loads for Bridges (in Persian), 2000, <https://shaghool.ir/Files/139-AeinNameBargozaryPolha.pdf> (15.03.2023)
- [24] *Szafrański M.*: Dynamic analysis of the railway bridge span under moving loads. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **17**, 4, 2018, 299-316, DOI: 10.7409/rabdim.018.019
- [25] Regulations of the technical and executive system of the Islamic Republic of Iran No. 308 – Guideline for Design of Retaining Walls, 2017 (in Persian), <https://geoparsian.com/wp-content/uploads/2020/12/Code-308-1.pdf> (15.03.2023)