Ambient modal testing of a double-arch dam: the experimental campaign and model updating

Abstract. A finite element model updating of a double-curvature-arch dam (La Tajera, Spain) is carried out hereof using the modal parameters obtained from an operational modal analysis. That is, the system modal dampings, natural frequencies and mode shapes have been identified using output-only identification techniques under environmental loads (wind, vehicles). A finite element model of the dam-reservoir-foundation system was initially created. Then, a testing campaign was then carried out from the most significant test points using high-sensitivity accelerometers wirelessly synchronized. Afterwards, the model updating of the initial model was done using a Monte Carlo based approach in order to match it to the recorded dynamic behavior. The updated model may be used within a structural health monitoring system for damage detection or, for instance, for the analysis of the seismic response of the arch dam reservoir-foundation coupled system.

چکیده. با استفاده از پارامترهای مودال به دست آمده از آنالیز مودال عملیاتی، به روزرسانی مدل المان محدود یک سد دو قوسی (لا تاجرا، اسپانیا) انجام می شود. به این ترتیب که ضرایب میرایی مودال سیستم ، فرکانسهای طبیعی و اشکال مودی با استفاده از تکنیک های شناسایی تنها – خروجی تحت بارهای محیطی (باد ، وسایل نقلیه) شناسایی شده اند. در ابتدا مدل المان محدودی از مجموعه سازه پی – سد – مخزن ایجاد شد. سپس ، یک کارزار آزمایش محیطی با استفاده از شتاب سنج های با حساسیت بالا در موثرترین نقاط به صورت بی سیم و هم زمان شده انجام شد. پس از آن ، به روزرسانی مدل المان محدود اولیه با استفاده تکنیک مونت کارلو به منظور مطابقت مدل با رفتار دینامیکی حاصل از آزمون ها انجام شد. مدل به روز شده می تواند در یک سیستم پایش سلامت سازه برای تشخیص خسارت یا به عنوان مثال ، برای انجام مطالعات لرزه ای سیستم سازه ترکیبی سد –مخزن – پی مورد استفاده قرار گیرد.

1. Introduction

The safety of concrete dams is nowadays a subject of increasing importance due to the new safety regulations and economy requirements since failure of dams may cause loss of human lives and properties downstream of the structure. The dynamic testing of dams is a very interesting nondestructive test to add to common existing monitoring systems, such as piezometric measures, pendulums, differential settlement gauges, etc. It provides valuable information about dam global structural behaviour, as well as a tool to track possible structural damage. This can be achieved updating a numerical model used within a Structural Health Monitoring system (SHM). The mechanical behaviour of the dam is highly influenced by the surrounding foundation [1–3], and the dynamic analysis of slender double-arch dams allows to obtain information of the whole structural system formed by the arch plus the foundation.

ایمنی سدهای امروزه به دلیل مقررات ایمنی آیین نامه ها و الزامات اقتصادی از اهمیت بیشتری برخوردار است زیرا آسیب سدها ممکن است باعث از بین رفتن جان انسان ها و دارایی ها در پایین دست سازه شود. آزمایش دینامیکی سدها یک آزمایش غیرمخرب بسیار جالب برای ارتقای سیستم های نظارت رایج موجود مانند حسگرهای پیزومتریک ، آونگ ها ، سنجش های نشست سازه و غیره است. این سیستم با ایجاد امکان رصد آسیب محتمل در سازه ، اطلاعات ارزشمندی در خصوص رفتار کلی سازه فراهم می آورد. همچنین مدل عددی به روز شده از سازه می تواند مورد استفاده در یک سیستم پایش سلامت سازه (SHM) قرار گیرد. رفتار مکانیکی سد بسیار تحت تأثیر فونداسیون های اطراف سازه است [۳–۱] ، و آنالیز دینامیکی سدهای دو قوسی باریک این امکان را فراهم می آورد تا اطلاعات کل سیستم سازه متشکل از سازه قوسی به علاوه پی بدست آید. This paper describes the modal testing and the model updating of the Tajera dam. This is a doublearch concrete dam located in river basin of Tajuña River (Guadalajara, Spain). The dam is 62 m high, 220 m wide at the crest with a reservoir capacity of 64 Hm³. This structure is being intensively monitored because a crack appeared during the construction process in 1993 that required important interventions at that date.

در این مقاله به تشریح تست مودال و به روزرسانی مدل سد تاجرا می پردازیم. این یک سد بتنی دو قوسی است که در حوضه رودخانه تاجوجا (گوادالاجارا ، اسپانیا) واقع شده است. این سد ۶۲ متر ارتفاع ، ۲۲۰ متر عرض در تاج با ظرفیت مخزن ۶۴ میلیون متر مکعب دارد. این سازه به طور جدی مورد نظارت قرار دارد زیرا در سال ساخت ۱۹۹۳ شکافی در سازه ظاهر شد که در آن تاریخ به مداخلات مهمی احتیاج داشت.

Acceleration measurements were carried out using high-sensitivity accelerometers wirelessly synchronized which enable to undergo the Operational Modal Analysis (OMA) of the structure. In order to quantify uncertainties due to the estimation process, two OMA methods based on the Stochastic Subspace Identification (SSI) technique have been used to extract the modal parameters. The structural system formed by the dam body and the foundation has been modelled using the ANSYS R Finite Element Method (FEM) suite of software. The model updating is carried out using the experimental results.

اندازه گیری پارامترهای شتاب با استفاده از شتاب سنج های با حساسیت بالا به صورت بی سیم و همزمان پایه انجام شد که امکان انجام آنالیز مودال عملیاتی (OMA) سازه را فراهم می آورد. به منظور کاهش عدم قطعیت در فرایند آنالیز سیگنال ، از دو روش OMA مبتنی بر تکنیک شناسایی زیرفضای تصادفی (SSI) برای استخراج پارامترهای مودال استفاده شده است. سیستم سازه متشکل از بدنه سد و پی با استفاده از مجموعه نرم افزار ANSYS مدل سازی شده است. به روز رسانی مدل با استفاده از نتایج آزمونهای تجربی انجام می شود.

Model updating methods are divided into direct and indirect methods. On the one hand, direct methods provide a computationally efficient approach that updates the components FEM matrix in one step [4,5]. This methodology requires a very accurate FEM model and high quality measurements. However, the use of direct methods often make optimization of parameters unrealistic, losing thus their physical meaning [4]. On the other hand, indirect methods computes objective functions that are minimized in order to reduce the error between analytical and experimental results. The latter has been the option adopted in this work. The objective function is minimized on the material properties updating the dynamic FEM model behaviour to the measured one.

روشهای به روز رسانی مدل به روشهای مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می شوند. از یک طرف ، روشهای مستقیم یک روش محاسباتی کارآمد را ارائه می دهند که ماتریس FEM را در یک مرحله به روز می کند [۴،۵]. این روش نیاز به یک مدل FEM بسیار دقیق و اندازه گیری های با کیفیت بالا دارد. با این وجود ، استفاده از روشهای مستقیم اغلب بهینه سازی مقادیر پارامترها را غیرواقعی می کند و بدین ترتیب معنای فیزیکی آنها را از دست می دهد [۴]. از طرف دیگر ، روشهای غیرمستقیم با محاسبه توابع هدف که باید در حالت کمترین قرار گیرند باعث کاهش خطا بین نتایج تحلیلی و آزمایشی می شوند. مورد دوم گزینه اتخاذ شده در این کار بوده است. تابع هدف با به کارگیری پارامترهای خواص مواد سازه و به روزرسانی مدل دینامیکی FEM با مدل اندازه گیری شده، به حداقل می رسد.

The paper continues with the description of the structure, the undergone experimental campaigns as well as the OMA results. Section 3 depicts the FEM model of the structure followed by the model calibration process carried out from the measured modal parameters. Finally, some conclusions are drawn and suggestions for future work are given.

مقاله با توضیحاتی از سازه ، کارزارهای آزمایشات میدانی و همچنین نتایج OMA ادامه می یابد. بخش ۳ مدل FEM سازه را ترسیم می کند و روند کالیبراسیون مدل توسط پارامترهای مودال اندازه گیری شده را نشان می دهد. سرانجام ، برخی نتیجه گیری ها و پیشنهادهایی برای کارهای بعدی ارائه می شود.

2. Structure description and its experimental modal testing

2.1. Tajera dam. Description

The Tajera Dam is located on the Tajuña river, in the municipality of El Sotillo in the province of Guadalajara, Spain. The main function of this structure is the regulation of the river to provide the demands associated to the downstream basin. The typology of the dam is double curvature arch with 62 m high above foundation, a crest of 220 m long and a volume of 68 Hm³ reservoir. The concrete wall of the dam consists of 13 blocks, including 11 of 16.5 m long and one more at each abutment of 20 m long. The crest has a single-track road and both-side pedestrian sidewalks (see Figure 1).

سد تاجرا در رودخانه تاجوجاا ، در شهرداری ال سوتیلو در استان گواتالاجارا ، اسپانیا واقع شده است. کارکرد اصلی این سازه تنظیم رودخانه برای تأمین نیازهای مرتبط با حوضه پایین دست است. این سد از نوع دوقوسی با ارتفاع ۶۲ متر از روی پی ، تاج به طول ۲۲۰ متر و حجم مخزن ۲۸ Hm3 است. دیواره بتونی سد از ۱۳ بلوک تشکیل شده است که از این تعداد ۱۱ قطعه ۱۶/۵ متر طول و دو قطعه دیگر در هر گوشه سد طول ۲۰ متر دارد. تاج سد دارای جاده ای یک مسیره و دوپیاده راه در دو طرفه است (شکل ۱ را ببینید)

In 1993, during the construction process, a crack was detected [6]. To repair the damage, the internal bottom gallery was filled with concrete and, since then, the structure has been carefully monitored. Therefore, the information available, added to the slenderness of the structure that makes it suitable for OMA, has influenced on its selection for this investigation.

در سال ۱۹۹۳ در طی مراحل ساخت و ساز ، یک شکاف در سازه ایجاد شد [۶]. برای ترمیم خسارت، گالری بازدید داخلی پایین با بتن پر شد و از آن زمان تاکنون سازه با دقت مورد نظارت قرار گرفته است. بنابراین اطلاعات موجود در مورد این سازه و همچنین باریک بودن سازه که آن را برای OMA مناسب می کند ، در انتخاب این سازه برای این تحقیق تأثیر داشته است.

2.2. Ambient modal analysis

The OMA has been carried out using 10 V/g sensitivity accelerometers (PCB 393B31 and 393B12) distributed along the crest in radial direction. The accelerometers are synchronized wiressly using a *ZigBee* protocol allowing up to 100 nanoseconds of precision [7]. The synchronization process effect on the modal estimation is further studied in ref. [8].

آزمون OMA با استفاده از شتاب سنج هایی با حساسیت *V/g* که در طول تاج در جهت شعاعی سد توزیع شده بودند، انجام شده است. شتاب سنج ها با استفاده از پروتکل ZigBee به طور همزمان همگام می شوند و تا ۱۰۰ نانو ثانیه از دقت را امکان پذیر می کنند. اثر فرآیند هماهنگ سازی در برآورد مودال سازه به طور مفصلتر در منبع ۸ آمده است.

An experimental campaign was carried out on 9 July 2015 without presence of precipitation and with 49.74% of water volume capacity (950.369 m.s.n.m. and 29.625 Hm³). The maximum, minimum and average temperatures recorded on the day were 18.5, 11.6 and 14.4 °C, respectively.

یک کارزار آزمایشی در ۹ ژوئیه ۲۰۱۵ بدون حضور باران و با ۴۹٬۷۴٪ ظرفیت حجم آب انجام شد. حداکثر ، حداقل و میانگین دمای ثبت شده در روز به ترتیب ۱۱/۶ ، ۱۱/۶ و ۱۴/۴ درجه سانتیگراد بود.



(a) Lateral view.

(b) Downstream face of the dam.





Figure 2. Accelerometers positions along the dam crest. Symbol "" represents the accelerometer positions.

At the measurement time, the temperature was 18.1 °C. After several trial tests, it was decided to place only accelerometers along the crest of the dam. During this campaign two measurements of 30-min. recording were carried out. Figure 2 shows the 20 test points used for both tests. All these points were distributed along the crest of the dam, at locations where the highest modal displacements occur. In addition, the lack of intermediate galleries makes the placing of sensors at different heights a complex task so that this possibility was dismissed.

در زمان اندازه گیری دمای هوا ۱۸٫۱ درجه سانتی گراد بود. پس از انجام چندین آزمون آزمایشی ، تصمیم بر این شد که شتاب سنج ها در امتداد تاج سد قرار گیرند. در طول این کمپین دو اندازه گیری ۳۰ دقیقهای انجام شد. ضبط انجام شد. شکل ۲، ۲۰ نقطه قرارگیری حسگرها را در هر دو آزمون نشان می دهد. همه این نقاط در امتداد تاج سد ، در مکانهایی که بیشترین تغییر مکان های اشکال مودی اتفاق می افتند توزیع شده است. علاوه بر این ، نبود گالری های میانی ، قرار دادن سنسورها در ارتفاعات مختلف سازه را به یک کار پیچیده تبدیل می کند و در نهایت این امکان از بین رفت. For the first test, it was decided to record the data with the bottom outlet open initially and after 15-min. recording was cut-off. It was observed that under the bottom outlet working, high-frequency noise was added to the measures. Figure 3 shows channel 5 time history in which the closing of the bottom outlet is clearly appreciated. Additionally, it was observed that accelerometers located near the abutments showed less-noisy signals than those located closed to the center. This fault might be due to: a) the operation of the bottom outlet introduces high-frequency noise, and b) the higher wind at the center of the dam, as compared to the area near the abutments.

برای اولین آزمایش ، تصمیم بر این شد که داده ها را ابتدا برای ۱۵ دقیقه در حالت باز دریچه خروجی آب ضبط کنند وسپس در حالت برای اولین آزمایش ، تصمیم بر این شد که در صورت باز بودن دریچه خروجی پایین، نویز با فرکانس بالا به داده ها اضافه شده است. شکل ۳ بسته. ضبط قطع شد. مشاهده شد که در صورت باز بودن دریچه خروجی پایین، نویز با فرکانس بالا به داده ها اضافه شده است. شکل ۳ تاریخچه زمانی داده کانال ۵ را نشان می دهد که در آن بسته شدن دریچه خروجی پایین به وضوح مشخص است. علاوه بر این ، مشاهده شد که شتاب سنجهای واقع در نزدیکی کوله ها سیگنالهای نویز کمتری نسبت به آنهایی که در وسط سازه هستند نشان می دهند. این خطا ممکن است به این دلیل باشد: الف) عملیات خروج آب از دریچه پایین نویزهایی با فرکانس بالا ایجاد می کند ، و ب) وزش باد شدیدتر در مرکز سد ، نسبت به منطقه نزدیک به کوله ها.







Figure 4. Spectrogram of channel 1 using short Fast Fourier Transform.

The sampling frequency of the acquisition system is 1302.083 Hz. The raw data are filtered using a Butterworth low-pass filter of order 5 with a cut-off frequency at 17.5 Hz. Besides, the raw data are decimated with a decimation factor of 36 providing a final sampling frequency of 36.17 Hz; therefore, the Nyquist frequency becomes 18.08 Hz. Figure 4 shows the spectrogram of channel 1 using the short Fast Fourier Transform. Interestingly, the natural frequencies are observed during the whole test for this near-to-abutment point.

فرکانس نمونه گیری از سیستم جمع آوری داده ها ۱۳۰۲٬۰۸۳ هرتز است. داده های خام با استفاده از فیلتر کم گذر Butterworth مرتبه ۵ با فرکانس قطع در ۱۷٫۵ هرتز فیلتر می شوند. علاوه بر این ، داده های خام با ضریب تجزیه ۳۶ کاهش می یابد و فرکانس نمونه گیری نهایی ۳۶٫۱۷ هرتز را در اختیار شما قرار می دهد. بنابراین ، فرکانس Nyquist 18.08 هرتز می شود. شکل ۴ گراف طیف کانال ۱ را با استفاده از تبدیل سریع فوریه (Fierier Transform) نشان می دهد. جالب توجه است که فرکانسهای طبیعی در طول کل آزمون ها برای نقطه نزدیک به کوله مشاهده می شود.

Two different OMA techniques based on the SSI [9] and programmed in MATLAB[®] are used for test. The techniques used are: covariance-driven SSI (SSI-*cov*) and data-driven SSI (SSI-*data*). The same criteria to define a pole of the stabilization diagram as stable are used for the two identification techniques. These criteria have to fulfill three requirements against estimates of the previous statespace order: (i) the frequency must match within 1% (relative), (ii) the damping ratio must match within 5% (absolute), and (iii) the mode shapes must match within 95%, using the Modal Assurance Criteria (MAC) for comparing. Additionally, modes with identified damping ratios higher than 5% are also rejected.

دو روش مختلف OMA مبتنی بر [9] SSI و برنامه نویسی شده در MATLAB برای آنالیز آزمون ها استفاده می شود. تکنیک های مورد استفاده عبارتند از SSI : مبتنی بر کواریانس (SSI-cov) و SSI مبتنی بر داده .(SSI-data) همان معیارهایی که برای تعریف یک پل از گراف پایداری استفاده می شود، برای این دو روش شناسایی مودال نیز کاربرد دارد. این معیارها باید سه الزام را در برابر تخمین های از گراف پایداری استفاده می شود، برای این دو روش شناسایی مودال نیز کاربرد دارد. این معیارها باید سه الزام را در برابر تخمین های از گراف پایداری استفاده می شود، برای این دو روش شناسایی مودال نیز کاربرد دارد. این معیارها باید سه الزام را در برابر تخمین های ترتیب قبلی حالت فضا برآورده کند (i) :فرکانس باید با ۱٪ (نسبی) مطابقت داشته باشد ، (ب) نسبت میرایی باید در ۵٪ (مطلق) و (iii) اشکال مودی باید در ۵۸٪ مطابقت داشته استه باشد ، این ، مود هایی با نسبت میرایی شناسایی شده بالاتر اشکال مودی باید در ۵۵٪ مطابقت داشته باشد ، این ، مود هایی با نسبت میرایی شناسایی شده بالاتر اشکال مودی باید در ۵۵٪ مطابقت داشته باشد ، رب نسبت میرایی شناسایی شده بالاتر اشکال مودی باید در ۵۵٪ مطابقت داشته باشد ، رب نسبت میرایی باید در ۵٪ (مطلق) و (iii) اشکال مودی باید در ۵۵٪ مطابقت داشته باشد با ۵٪ (نسبی) ، علوم بر این ، مود هایی با نسبت میرایی شناسایی شده بالاتر از ۵۸٪ باید با ۵٪ (نسبی اید با ۵۰٪ (نسبی اید با ۵۰٪ (نسبی) . علاوه بر این ، مود هایی با نسبت میرایی شناسایی شده بالاتر از ۵۸٪ نیز رد می شوند.



Figure 5. Selected poles with two different methods. (--) SSI-cov and (•) SSI-data.



Figure 6. First two modal shape estimates along the dam crest for the second test using SSI-*data* technique. (- - -) represents the undeformed dam crest and ($^{\circ}$) indicates the modal displacement at the test points.

شکل ۶ برآورد شکل دو مود اول در طول تاج سد برای آزمایش دوم با استفاده از تکنیک SSI . خط چین ها نشان دهنده تغییر مکان های تاج سد اصلاح نشده و (°) نشان دهنده جابجایی مودال در نقاط آزمون است.

The SSI-*cov*, programmed in MATLAB[®], has the advantage of its conceptual simplicity and the ability to compute the Probability Density Function of the identified system parameters. It selects the average values of the modal parameters for each column (of stable aligned poles) with a minimum number of stable poles [10]. The SSI-*data* has been applied using MACEC (Commercial Toolbox of MATLAB[®] for modal analysis [11]), and it has the advantage of an optimal statistical performance when the weighting matrices are properly chosen. A statistical analysis of the stable poles is used to select final results [12].

SSI-cov، که در MATLAB R برنامه نویسی شده است ، از مزیت سادگی مفهومی و توانایی محاسبه عملکرد احتمال چگالی پارامترهای سیستم شناسایی شده برخوردار است. این مقادیر میانگین پارامترهای مودال را برای هر ستون با حداقل تعداد پل های پایدار انتخاب می کند [۱۰]. داده SII با استفاده از MACEC آنالیز شده است ، و در هنگام انتخاب ماتریسهای وزنی از مزیت عملکرد آماری بهینه برخوردار است. از آنالیز آماری پل های پایدار برای انتخاب نتایج نهایی استفاده می شود [۱۲]

Figure 5 illustrates the final selected poles for the two techniques and the averaged normalized power spectral density both the second test. From the above mentioned characteristics, the recommendations given in [13] and the author's experience, the use of several methods simultaneously is a good way to improve the results as well as to quantify the estimation uncertainties. Finally, Table 1 shows the estimated natural frequencies for both test and for both techniques. Frequencies with the same color belong to the same vibration mode. Figure 6 shows an example of identified modal shapes corresponding to the lowest two modes obtained with SSI-*data* in the second test.

شکل ۵ پل های منتخب نهایی را برای دو روش نشان می دهد و میانگین نرمال شده تراکم طیفی را برای هر دو روش در آزمون دوم نشان می دهد. از خصوصیات ذکر شده در بالا ، توصیه های ذکر شده در [۱۳] و تجربه نویسنده ، استفاده از چندین روش به طور همزمان روشی مناسب برای بهبود نتایج و نیز کاهش عدم قطعیت های تخمین است. سرانجام ، جدول ۱ فرکانسهای طبیعی تخمین زده شده را برای دو تست و برای هر دو روش نشان می دهد. فرکانسهایی با یک رنگ متعلق به یک مود ارتعاشی است. شکل ۶ نمونه ای از اشکال مودی شناسایی شده مربوط به دو مود اول به دست آمده با داده های SIS در آزمایش دوم را نشان می دهد.

	1 st	test	2 nd test		
Mode	SSI-cov (Hz)	SSI-data (Hz)	SSI-cov (Hz)	SSI-data (Hz)	
1	5.3439	6.2381	5.3124	5.3114	
2	6.2535	7.6381	6.2857	6.2727	
3	7.6404	9.3104	7.6363	7.6435	
4	9.3146	12.0025	9.3165	9.3148	
5	12.0326	12.0124	11.8386	12.0421	
6	14.4093	14.4286	12.0477	12.1095	
7	15.5822		14.2930	14.3089	
8			14.4312	14.4526	
9			15.5844	15.5797	
10				17.3580	
	7 modes	6 modes	9 modes	10 modes	

Table 1. Frequencies of the selected modes (f_{OMA}).

3. Finite Element Model Updating

3.1. Finite Element Model description

This work makes use of a previous model statically calibrated with different measurements related to the static behaviour of the dam. This first calibration makes that the starting model is already a fairly well adjusted model. The model is a 3D FEM model with 2247 8-nodes solid elements, 3608 nodes and 5 different types of materials: one for the concrete vault of the dam and 4 for the foundations, which further enhances the model. Figure 7 and Table 2 shows the location and the material properties used in the FEM model. The boundary conditions in the foundation were considered at a distance where the tension influence added from these restrictions on the vault can be neglected.

در این کار ابتدا از یک مدل قبلی که با اندازه گیری های مختلف مربوط به رفتار استاتیک سدکالیبره شده است، استفاده شده است. این کالیبراسیون ابتداعی باعث می شود که اولین مدل شروع ، یک مدل نسبتاً خوب باشد. این مدل یک مدل FEM سه بعدی با تعداد ۲۲۴۷ المان جامد هشت گره ای، ۳۶۰۸ گره و ۵ نوع مصالح مختلف است: یکی برای سازه بتونی سد و ۴ مصالح دیگر برای پی ها ، که این مدل را دقیق تر می کند. شکل ۷ و جدول ۲ موقعیت مکانی و خصوصیات مواد مورد استفاده در مدل FEM را نشان می دهد. شرایط مرزی در فونداسیون در فاصله ای در نظر گرفته شده است که می توان از تأثیر تنش اضافه شده از این محدودیتها بر سازه سد صرف نظر کرد.

The numerical modal analysis allows a number of vibration modes limited by the number of degrees of freedom available. However, only a reduced set of the first modes is usually considered. In this case, the first ten modes have been extracted and consistent mass matrix has been used, given the natural frequencies shown in the Table 3.

آنالیز عددی مودال اجازه می دهد تا تعدادی از مود های ارتعاشی بر اساس تعداد درجات آزادی محاسبه گردد. با این حال ، معمولاً فقط یک مجموعه مود کاهش یافته از مودهای اول سازه در نظر گرفته می شود. در این حالت ، ده مود اول استخراج شده است و با استفاده از ماتریس جرم سازه فرکانسهای طبیعی نشان داده شده در جدول ۳ ، به دست آمده است. The Block Lanczos method has been used to solve the eigenvalue problem. Figure 8 shows the first vibration mode, from top and isometric view, and Figure 9 shows the top view of the first four vibration modes. Finally, Table 4 shows both, experimental and numerical estimations of natural frequencies, together with initial relative errors, for the first four estimations. The sum of the errors is also included for comparison. The experimental estimation obtained from the second test with SSI-*data* has been adopted as the experimental solution, f_{OMA} , since the higher number of estimations similar to the numerical ones were obtained (see Tables 1 and 3).

از روش Block Lanczos برای حل مسئله مقادیر ویژه استفاده شده است. شکل ۸ اولین مود ارتعاش را از نمای بالا و ایزومتریک نشان می دهد و شکل ۹ نمای بالای چهار مود ارتعاش اول را نشان می دهد. سرانجام ، جدول ۴ براورد های آزمایشاتی و عددی فرکانسهای طبیعی ، همراه با خطای نسبی اولیه ، را برای چهار مود اول نشان می دهد. مجموع خطاها نیز برای مقایسه گنجانده شده است. برآورد آزمایشاتی به دست آمده از آزمون دوم با روش SSI به عنوان راه حل نهایی پذیرفته شده است ، زیرا تعداد بیشتری تخمین مشابه روش عددی بدست آمده است (به جداول ۱ و ۳ مراجعه کنید).

Material number	Element	<i>E</i> (N/m²)	ρ (kg/m²)	v
1	Foundation 1	$1.37 \cdot 10^{10}$	$2.40 \cdot 10^3$	0.22
2	Foundation 2	$6.86 \cdot 10^{10}$	$2.40 \cdot 10^3$	0.25
3	Foundation 3	$9.81 \cdot 10^{10}$	$2.40 \cdot 10^3$	0.23
4	Foundation 4	$4.90 \cdot 10^{10}$	$2.40 \cdot 10^3$	0.35
5	Dam	$3.43 \cdot 10^{10}$	$2.40 \cdot 10^{3}$	0.22

Table 2. Summary of FEM materials. *E*: Young's Modulus, ρ : density and ν : Poisson's ratio.



Figure 7. FEM of the dam. Numbers indicate the material types.

Mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>f</i> _{FEM} (Hz)	4.9220	6.1435	7.2747	8.2567	10.511	11.285	11.639	12.209	12.760	13.244
Table D. Free and the FENA										

Table 3. Frequencies of the FEM.



(a) Top view.

(b) 3D view.





(c) Mode 3 (*f* =7.2748 Hz).

(d) Mode 4 (*f* =8.2567 Hz).

Figure 9. Top view of the first four modes.

	Mode f_{OMA} (Hz)	f _{FEM} (Hz) ε(%)	
1	5.3114	4.9220	7.33
2	6.2727	6.1435	2.06
3	7.6435	7.2748	4.82
4	9.3148	8.2567	11.36
			25.57

3.2. Model updating

As a first approach to the model updating, the following objective function has been adopted:



The first four modes are considering, N = 4, and using Table 4, the initial value of J = 6.2229% is obtained. Parameters μ_i weight the importance of each mode. Thus, the following weights have been adopted $\mu_1 = 0.2039$, $\mu_2 = 0.1635$, $\mu_3 = 0.1376$ and $\mu_4 = 0.1262$.



Figure 10. Scheme of model updating process.

The weight associated to each mode is numerically selected with ANSYS[®], according to the modal mass mobilized for each frequency (modal participation factor).

So, the FEM model was calibrated based on the experimental results using the Monte Carlo method [14], which is based on distributing randomly independent variables into prescribed ranges [15]. The material properties E_j and ρ_j shown in Table 2 have been considered as independent variables. The updating process is illustrated in Figure 10 in which the flowchart indicates that two packages of software have been used. That is, 10000 combinations of independent variables are generated in MATLAB[®] and the modal analysis is carried out in ANSYS[®]. Finally, the updated material properties are derived from the minimization of functional (1):

بنابراین ، مدل FEM بر اساس نتایج آزمایشاتی و با استفاده از روش مونت کارلو کالیبره شد [۱۴] ، که مبتنی بر توزیع متغیرهای غیر وابسته بصورت تصادفی در محدوده های تعیین شده است [۱۵]. خواص مصالح شامل Ej و ρ زمانن داده شده در جدول ۲ به عنوان متغیرهای غیروابسته در نظر گرفته شده است. روند به روزرسانی در شکل ۱۰ نشان داده شده است که در آن نمودار که از دو بسته نرم افزاری استفاده شده است. بدین معنی که ، ۱۰۰۰۰ ترکیب از متغیرهای مستقل در MATLAB R تولید می شود و آنالیز مودال در انجام می شود. در نهایت ، خواص مصالح به روز شده از حداقل سازی تابع هدف (۱) حاصل می شود:

$$\min_{E_j, \, \rho_j} J(E_j, \, \rho_j, \, \nu_i)$$
 with $j = 1, \cdots, 5,$ (2)

in which the ten considered independent variables are within a \pm 50% range of the initial values. Table 5 shows the summary of frequencies and errors after updating de FEM model of the Tajera Dam (as compared to Table 4). After this process, the value of the objective function becomes *J* = 2.8479%. The relative error reduces more than 50% with respect to the initial model. Table 6 shows a comparison between material properties values (before and after updating and the difference). The parameters have been changed up to \pm 35%. As it was expected, due to the weighting adopted in functional (1), the smallest error is obtained for the first mode. Figure 11 shows the frequency estimations for all the tests. Note that there is overlapping between estimations. The final numerical solution adopted are enclosed in a red cycle. Figure 12 depicts the influence of vault material properties on the first natural frequency estimation.

که در آن ده متغیر مستقل در نظر گرفته شده در محدوده ۵۰ ± از مقادیر اولیه هستند. در جدول ۵ خلاصه فرکانس ها و میزان خطاها پس از به روزرسانی مدل FEM سد تاجرا (در مقایسه با جدول ۴) نشان داده شده است. پس از این فرآیند ، مقدار تابع هدفPEM و بعد می شود. خطای نسبی درمقایسه با مدل اولیه بیش از ۵۰٪ کاهش می یابد. جدول ۶ مقایسه ای بین مقادیر خصوصیات مصالح (قبل و بعد از به روز رسانی و تفاوت) را نشان می دهد. پارامترهای تا ۳۵ ± تغییر یافته است. همانطور که انتظار می رفت ، با توجه به ضرایب وزنی به کار رفته در تابع هدف (۱) ، کمترین خطا برای مود اول بدست می آید. شکل ۱۱ تخمین فرکانس برای همه آزمایشات را نشان می دهد. توجه داشته باشید که بین برآوردها همپوشانی وجود دارد. آنالبز عددی نهایی اتخاذ شده در یک دایره قرمز محصور می شود. شکل ۲۱ تأثیر خواص مصالح سد را در برآورد فرکانس اول طبیعی نشان می دهد.

Mode	<i>f</i> _{ома} (Hz)	f _{FEM} (Hz)	ε(%)
1	5.3114	5.2973	0.27
2	6.2727	6.6052	5.30
3	7.6435	7.8061	2.13
4	9.3148	8.8842	4.62
			12.32

Table 5. Summary of frequencies after updating.

Element	Parameter	Initial value	Updating value	Difference (%)
Foundation 1	<i>E</i> (N/m ²)	1.37·10 ¹⁰	1.67·10 ¹⁰	21.78
Foundation 1	ho (kg/m ³)	2.40·10 ³	2.95 ·10 ³	22.64
Foundation 2	<i>E</i> (N/m²)	6.86·10 ¹⁰	5.43·10 ¹⁰	-34.08
Foundation 2	ho (kg/m³)	2.40·10 ³	2.15·10 ³	-10.47
	<i>E</i> (N/m ²)	9.81·10 ¹⁰	1.30·10 ¹¹	33.02
Foundation 3	ho (kg/m ³)	2.40·10 ³	2.29·10 ³	-4.74
	<i>E</i> (N/m ²)	4.90 •10 ¹⁰	5.47·10 ¹⁰	11.62
Foundation 4	ho (kg/m ³)	2.40·10 ³	2.10·10 ³	-12.57
	<i>E</i> (N/m ²)	3.43·10 ¹⁰	4.01·10 ¹⁰	16.97
Dam	ho (kg/m ³)	2.40·10 ³	2.41·10 ³	0.42

Table 6. Comparison between material properties values (before and after updating and difference).



Figure 11. Frequency estimations for the first four mode and for all the simulations. The red cycle indicates the solution adopted.



Figure 12. Vault material properties against the first frequency estimation. The red cycle indicates the adopted solutions.

4. Conclusions and ongoing works

The FEM model updating of a double-arch dam has been presented in this work. A quite simple model, using solid elastic elements, has been shown to represent quite well the dynamic behaviour of this structure. This model has been calibrated from the OMA using a fairly simple optimization approach based on Monte Carlo method. It has been demonstrated that our wireless synchronized acquisition system can be used from this kind of structure.

در این مقاله به روزرسانی مدل FEM یک سد دو قوسی ارائه شده است. یک مدل نسبتا ساده با استفاده از المان های جامد الاستیک نشان داده شده است که رفتار دینامیکی این سازه را به خوبی نشان می دهد. این مدل با استفاده از یک روش بهینه یابی نسبتاً ساده بر اساس روش مونت کارلو ازداده های OMA کالیبره شده است. همچنین نشان داده شده است که سیستم بی سیم هم زمان پایه ما می تواند در این نوع سازه ها استفاده شود.

A second campaign was also carried with different ambient conditions and water volume stored. This campaign was on 26/09/2015, without presence of precipitation and with a volume stored of 35.15% (946.729 m.s.n.m. and 20.935 Hm³). The maximum, minimum and average temperatures recorded were 10.5, 6.7 and 7.8 °C, respectively. The results obtained using the same signal processing and OMA parameters are shown in Table 7. It can be observed that under less water stored and smaller temperature, the natural frequencies are reduced appreciably. Therefore, further measurements must be made to study the impact of environmental agents on the modal parameters.

کمپین دوم آزمون نیز با شرایط مختلف محیطی و حجم آب ذخیره شده انجام شد. این کمپین در تاریخ ۲۰۱۵/۰۹/۲۶ ، بدون حضور بارش و با حجم ذخیره شده ۳۵٫۱۵٪ بود. حداکثر ، حداقل و متوسط دما ثبت شده به ترتیب ۱۰/۵ ، ۶/۶ و ۷/۸ درجه سانتیگراد بود. نتایج به دست آمده با استفاده از همان روش پردازش سیگنال و پارامترهای OMA در جدول ۷ نشان داده شده است. می توان مشاهده کرد که در حالت میزان حجم آب کمتر و دمای کمتر ، فرکانس های طبیعی به میزان قابل توجهی کاهش می یابد. بنابراین ، باید مطالعات بیشتری برای بررسی تأثیر عوامل محیطی بر پارامترهای مودال انجام شود.

Future work will explore other techniques to update the FEM model. Besides, a continuous monitoring together with automated modal identification is being planned to be installed in order to analyse dependencies between modal properties and water volume stored and environmental agents. The author's experience on a footbridge [16] will be employed for this task.

کارهای آینده تکنیک های دیگری را برای به روزرسانی مدل FEM کشف خواهد کرد. علاوه بر این ، یک سیستم پایش دائمی به همراه نرم افزار شناسایی خودکار مودال در نظر گرفته شده است تا وابستگی بین پارامترهای مودال و حجم آب ذخیره شده و عوامل محیطی را تحلیل نماید. تجربه نویسنده در [۱۶] برای این کار به کار خواهد رفت.

5. Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support provided by the Centre for the Development of Industrial Technology (CDTI) to make this work possible by funding from the SISTEDAMAS Project named "*Development of automatic wireless monitoring system for large dams*", with reference IDI-20131031. The authors also acknowledge the financial support provided by Research Project DPI2013-47441-P.

The authors also thank to the company *GCIPsa*, because they contributed with the initial FEM model of the dam.

	3 nd test Mode		
	SSI-cov (Hz)	SSI-data (Hz)	
1	5.1598	5.1647	
2	5.9002	7.1592	
3	7.1551	8.7833	
4	8.8124	8.8743	
5	8.9573	14.4433	
6	11.1068	15.1067	
7	12.5673		
8	13.2872		
9	14.4391		
10	15.1293		
11	15.7180		
12	16.1362		
	12 modes	6 modes	

Table 7. Frequencies of the selected modes.

References

- [1] Paulo Mendes and Sérgio Oliveira. Influence of the Intake Tower Dynamic Behaviour on Modal Identification of Cabril Dam. In *IOMAC 3rd International Operational Modal Analysis Conference*, Lisboa, 2009.
- [2] S Oliveira and M Espada. Long-term dynamic monitoring of arch dams . The case of Cabril dam , Portugal. In 15th World Conference On Earthquake Engineering, Lisbon, 2012.
- [3] Sérgio Oliveira, Anca Maria Toader, and Paulo Vieira. Damage identification in a concrete dam by fitting measured modal parameters. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 13(6):2888–2899, 2012.
- [4] Y. B. Yang and Y. J. Chen. A new direct method for updating structural models based on measured modal data. *Engineering Structures*, 31(1):32–42, 2009.
- [5] A. Berman and E. J. Nagy. Improvement of a Large Analytical Model Using Test Data. AIAA Journal, 21(8):1168–1173, 1983.
- [6] Nuevas tecnologías en la reparación de presas. la tajera. v0. Technical report, Hidráulica, Construcción y Conservación (HCC), 2002.
- [7] Alvaro Araujo, Jaime García-Palacios, Javier Blesa, Francisco Tirado, Elena Romero, Avelino Samartín, and Octavio Nieto-Taladriz. Wireless measurement system for structural health monitoring with high time-synchronization accuracy. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 61(3):801–810, 2012.
- [8] Jaime García-Palacios, Francisco Tirado-Andrés, José M. Soria, Iván M. Díaz, and Álvaro Araujo. Effects of time synchronization on operational modal analysis. In 6th International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC'15, May 2015.
- [9] P. Van Overschee and B. De Moor. Subspace Identification for Linear Systems. Boston: Kluwer Academic, 1996.
- [10] Bart Peeters and Guido De Roeck. Reference-Based Stochastic Subspace Identification for Output-Only Modal Analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 13(6):855–878, November 1999.
- [11] E. Reynders, M. Schevenels, and G. De Roeck. MACEC: a Matlab Toolbox for Experimental and Operational Modal Analysis. Technical report, University of Leuven (KUL), Belgium, 2008.
- [12] Edwin Reynders, Jeroen Houbrechts, and Guido De Roeck. Fully automated (operational) modal analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 29:228–250, May 2012.
- [13] Helmut Wenzel and Dieter Pichler. Ambient vibration monitoring. John Wiley & Sons, 2005.
- [14] George Fishman. Monte Carlo : concepts, algorithms, and applications. Springer-Verlag, New York, 1996.
- [15] Roger Eckhardt. Stan Ulam, John von Neumann, and the Monte Carlo Method. Los Alamos Science, pages 131–141, 1987.
- [16] José M Soria, Iván M Díaz, Jaime H García-palacios, and Norberto Ibán. Vibration Monitoring of a SteelPlated Stress-Ribbon Footbridge: Uncertainties in the Modal Estimation. *Journal of Bridge Engineering*, 2016.