

# Health monitoring of concrete dams: a literature review

P. Bukenya · P. Moyo · H. Beushausen · C. Oosthuizen

**Abstract** Health monitoring of concrete dams has become a topic of great importance and involves monitoring the static and dynamic behavior of large dams. This paper provides a literature review on the subject of health monitoring of concrete dams based on static and dynamic tests. The intent of this paper is to evaluate case studies in health monitoring of concrete dams whereby the reader can reflect on the various techniques that have been used in analyzing data in this field. The knowledge obtained will be used to highlight the state of the art and consequently advance the research in this field of dam engineering.

پایش بر سلامت سدهای بتنی به موضوعی با اهمیت تبدیل شده است و شامل پایش رفتار استاتیکی و دینامیکی سدهای بزرگ است. در این مقاله مروری بر ادبیات مقالات گذشته با موضوع پایش سلامت سدهای بتنی بر اساس آزمایشات استاتیکی و دینامیکی ارائه شده است. هدف از این مقاله، بررسی مطالعات موردی در زمینه پایش سلامت سدهای بتنی است که به موجب آن خواننده می تواند تکنیک های مختلفی را که در تحلیل داده ها در این زمینه استفاده شده است را به دست آورد. از دانش به دست آمده برای بهینه سازی وضعیت معماری و به تبع آن پیشبرد تحقیقات در این زمینه مهندسی سد استفاده خواهد شد.

## 1 Introduction

Concrete dams support economies by providing water for irrigation, hydroelectricity generation and flood control. The performance of these structures under operational and environmental loads may decrease over time due to age-related deterioration, floods and other factors. If concrete dams are not well managed and maintained, failure may occur leading to economic and life losses. Examples of disasters that have occurred in the world include Canyon Lake dam that claimed 236 people [1] and Austin dam failure which claimed lives of 78 people [2]. These disasters and their consequences can be minimized if appropriate dam safety monitoring and surveillance strategies are implemented.

سدهای بتنی با تأمین آب برای آبیاری، تولید برق و کنترل سیل، اقتصاد را پشتیبانی می کنند. عملکرد این سازه ها تحت بارهای عملیاتی و محیطی ممکن است با گذشت زمان به دلیل فرسایش، سیل و عوامل دیگر کاهش یابد. اگر سدهای بتنی به خوبی مدیریت و نگهداری نشوند، ممکن است خرابی رخ دهد که منجر به خسارات اقتصادی و انسانی شود. نمونه هایی از بلایای رخ داده در جهان عبارتند از سد دریاچه کانیون که جان ۲۳۶ نفر را گرفت [۱] و شکست سد آستین که جان ۷۸ نفر را گرفت [۲]. در صورت اجرای مناسب استراتژی های پایش و ایمنی سد، می توان این فجایع و پیامدهای آنها را به حداقل رسید.

Health monitoring of concrete dams commonly referred to as dam surveillance is a process of assessing the structural integrity of dams through detection of any abnormality as early as possible which could be an indicator of some danger and allowing sufficient forewarning for the implementation of appropriate corrective measures. Regulations and guidelines have been developed to help dam engineers to monitor the structural integrity of dams. Examples of regulations and guidelines include the UK Reservoir which gives dam owners the responsibility of monitoring dams [3], Australian National Commission on Large Dams [4], South African National Commission on Large Dams [5] and in more detail with respect to formalized monitoring by the International Commission on Large Dams [6].

پایش سلامت سدهای بتنی که معمولاً تحت عنوان ایمنی سدها از آن یاد می شود، فرایندی برای ارزیابی یکپارچگی سازه سدها از طریق تشخیص هرگونه نشانه غیر معمول در کمترین زمان ممکن است که این امر می تواند نمایانگر برخی از مخاطرها و در نهایت با امکان بروز اخطار برای اجرای اقدامات اصلاحی مناسب هستند. آیین نامه ها و دستورالعمل هایی برای کمک به مهندسان سد برای پایش یکپارچگی و سلامت سازه سدها ارائه شده است. نمونه هایی از آیین نامه ها و دستورالعمل ها شامل دستورالعمل بریتانیا است که مسئولیت پایش سدها را به صاحبان سد می دهد [۳]، کمیسیون ملی استرالیا در مورد سدهای بزرگ [۴]، کمیسیون ملی سدهای بزرگ آفریقای جنوبی [۵] و جزئیات بیشتر در این ارتباط توسط کمیسیون بین المللی سدهای بزرگ [۶].

The traditional procedure for evaluating the structural integrity of dams is through visual inspections. Visual inspections are conducted by experienced engineers who later recommend actions to be carried out on dams under inspections to solve the identified problems. Visual inspections have various shortcomings such as high manpower demand, often insufficient frequency and inaccessibility of critical parts of the structure under surveillance. For example, if damage develops on the upstream side, under water level or contact between dam and foundation rock, it is difficult to observe them directly. The consequential shortage of information pertaining to the structural condition may result in an erroneous condition evaluation and hence uninformed decisions regarding the maintenance of the structure. The shortcomings of visual inspections can be overcome by the use of full-scale field tests. Field tests are conducted to determine and monitor static and dynamic properties of the structure under environmental conditions. Static properties and dynamic properties are determined through static and dynamic monitoring processes, respectively.

در روش سنتی، ارزیابی سلامت سازه ای سد ها از طریق بازرسی بصری انجام می شود. بازرسی های بصری توسط مهندسين باتجربه انجام می شود که بعداً برای حل مشکلات شناسایی شده اقدامات لازم را برای سد های تحت بازرسی پیشنهاد می دهند. بازرسی های بصری دارای کاستی های مختلفی از جمله تقاضای نیروی انسانی بالا و غالباً در دوره های زمانی ناکافی و عدم دسترسی به بخش های مهم سازه می باشد. به عنوان مثال، اگر آسیب در قسمت بالادست، زیر سطح آب یا در قسمت تماس بین سد و بستر سنگی، ایجاد شود، مشاهده مستقیم آن آسیبه دهنده است. متعاقباً کمبود اطلاعات مربوط به شرایط سازه ممکن است منجر به یک ارزیابی نادرست و در نتیجه تصمیم گیری های اشتباه در مورد نگهداری از سازه شود. کاستی های بازرسی های بصری را می توان با استفاده از تست های میدانی روی سازه واقعی برطرف کرد. آزمایش های میدانی برای تعیین و پایش خصوصیات استاتیکی و دینامیکی سازه در شرایط محیطی سازه انجام می شود. مشخصات استاتیکی و دینامیکی از طریق فرآیندهای پایش استاتیکی و دینامیکی تعیین می شوند.

In static monitoring, environmental characteristics such as wind speed, air temperature and water temperature are measured as the deformation of the dams, strains and stresses. Data obtained from static monitoring is either analyzed using statistical and or deterministic models [7]. Statistical models are based on correlations between environmental factors (reservoir water level, ambient temperatures, wind) and dam responses (displacements, pressures, stresses). These correlations are estimated by performing statistical analysis of historical data [8]. In the dynamic monitoring approach, structural responses in form of accelerations due to vibrations are measured. Accelerations are obtained using either forced vibration tests or ambient vibration tests [9]. Dynamic properties (natural frequencies, mode shapes and damping ratios) can then be extracted from the accelerations using modal analysis techniques [10].

در پایش استاتیک، خصوصیات محیطی مانند سرعت باد، دمای هوا و دمای آب به عنوان تغییر شکل سدها، کرنش ها و تنش ها اندازه گیری می شود. داده های به دست آمده از مانیتور استاتیک یا با استفاده از مدل های آماری یا قطعی تجزیه و تحلیل می شوند [7]. مدل های آماری مبتنی بر همبستگی بین عوامل محیطی (سطح آب مخزن، دمای محیط، باد) و پاسخ سدها (جابجایی ها، فشارها، تنش ها) است. این همبستگی ها با انجام تجزیه و تحلیل آماری داده های تاریخی تخمین زده می شود [8]. در رویکرد پایش دینامیکی، پاسخ های سازه در قالب پارامتر شتاب در اثر ارتعاشات اندازه گیری می شود. شتاب ها با استفاده از تست های ارتعاش اجباری یا آزمایش های ارتعاش محیطی به دست می آیند [9]. سپس خصوصیات دینامیکی (فرکانسهای طبیعی، اشکال مودی و نسبت میرایی) با استفاده از تکنیک های تحلیل مودال می توانند از شتاب ها استخراج شوند.

Significant research has been done in the area of health monitoring of dams with the dual purpose of understanding the behavior of these structures and prevention of failure. Therefore, it is better practice that dam engineers and researchers have knowledge on which methods have been used in the analysis of data collected from static and dynamic monitoring of dams. This paper provides a literature review of the case studies in health monitoring of dams whereby the reader can reflect on the methods that have been used and understand advantages and limitations of the various approaches. The knowledge obtained will be used to highlight the state of the art in health monitoring of concrete dams and to point out future research needs.

در زمینه پایش سلامت سدها با هدف درک رفتار این سازه ها و جلوگیری از خرابی آنها تحقیقات قابل توجهی انجام شده است. بنابراین بهتر است مهندسين سد و محققان از دانش روشهایی که در تحلیل داده های جمع آوری شده از پایش استاتیکی و دینامیکی سدها استفاده شده اند برخوردار باشند. این مقاله مروری بر تاریخچه ادبیات مقالات و مواردی که در زمینه پایش سلامت سدها وجود دارد تمرکز می کند که به موجب آن خواننده می تواند در مورد روشهای مورد استفاده تأمل کند و مزایا و محدودیتهای روشهای مختلف را درک کند. از دانش به دست آمده برای بهبود وضعیت موجود در زمینه پایش سلامت سدهای بتنی و کمک به نیازهای تحقیقاتی آینده، استفاده خواهد شد.



The paper is organized as follows: Sect. 2 presents static monitoring of dams addressing the name of the dam, how long were the data and which methods were used in the analysis. Tremendous amount of literature concerning dynamic monitoring of concrete dams have been published over years; however, only representative papers and case studies regarding ambient vibration monitoring of dams are reviewed in Sect. 3. Case studies related to seismic monitoring of dams are not reviewed as they are out of scope of this paper. Section 4 gives a general summary of the literature review provided in the paper highlighting the progress that has been made in health monitoring of dams. Finally, Sect. 5 identifies the critical issues in the review and concludes the paper.

مقاله حاضر به شرح زیر ارائه می شود: در قسمت ۲: مانیتور استاتیکی سدها را نشان می دهد که با ذکر نام سد بیان میکند داده ها چه مدت و چه روش هایی در تجزیه و تحلیل استفاده شده است. مقالات بسیار زیادی درباره پایش دینامیکی سدهای بتونی طی سالهای گذشته منتشر شده است. با این حال، فقط مقالات و مطالعات موردی موجود در زمینه پایش سدها به روش ارتعاش محیطی در بخش ۳ بررسی شده است. مطالعات موردی مربوط به پایش لرزه ای سدها در این مقاله بررسی نشده زیرا خارج از اهداف آن است. بخش ۴ خلاصه ای از مرور مقالات ارائه شده را نشان می دهد و پیشرفت هایی که در این زمینه انجام شده است را بیان می کند. سرانجام در بخش ۵ موضوعات مهم را جهت نتیجه گیری ارائه می کند.

## 2 Static monitoring of dams

Static monitoring of dams involves measurement of static factors such as ambient temperatures, reservoir level, opening and closing of joints, crack opening, displacements and strains which are measured accurately by instruments. A lot of data are collected from the different instruments; hence interpretation of these data is important in structural health monitoring (SHM) of concrete dams. In static monitoring, data interpretation enables in taking into account of any effects of loads separately on the structural behavior of dams. This is done either using statistical and/ or deterministic models. Statistical models establish relationships between the present and the past behavior of the dam. The accuracy of this model depends on the amount and reliability of the available data. This approach provides an answer to the question: Does current dam behavior correspond to behavior observed in the past? Deterministic models establish the relationship between the loads and the dam response defined by a structural analysis. This approach answers the question: Does current dam behavior correspond what it should be? Such approaches try to correlate field results and analytical results from a model.

پایش استاتیکی بر روی سدها شامل اندازه گیری عوامل استاتیکی از قبیل دمای محیط، سطح مخزن، باز و بسته شدن اتصالات، گسترش ترک، جابجایی ها و کرنش ها است که به وسیله ابزار دقیق اندازه گیری می شوند. داده های زیادی از ابزارهای مختلف جمع آوری می شود. از این رو، تفسیر این داده ها در موضوع پایش سلامت سازه (SHM) سدهای بتونی دارای اهمیت است. در پایش استاتیکی، تفسیر داده ها با در نظر گرفتن هرگونه تأثیر بار به طور جداگانه بر رفتار سازه سدها امکان پذیر است. این هدف با استفاده از مدل های آماری و / یا مدل قطعی انجام می شود. مدل های آماری روابط بین حال و گذشته سد را برقرار می کند. دقت این مدلها به مقدار داده و میزان قابلیت اطمینان به داده های موجود بستگی دارد. این رویکرد پاسخی به این سؤال می دهد: آیا رفتار سد فعلی با رفتارهای مشاهده شده در گذشته مطابقت دارد؟ مدل های قطعی رابطه بین بارهای وارده و پاسخ سازه سد که توسط یک آنالیز سازه ای انجام می شود را برقرار می کنند. این رویکرد به این سؤال پاسخ می دهد: آیا رفتار سد فعلی مطابقت دارد با آنچه که باید باشد؟ چنین رویکردهایی سعی در همبستگی نتایج میدانی بدست آمده از سازه و نتایج تحلیلی از یک مدل کامپیوتری دارد.

Bianchi and Bremen [7] presented procedures to carryout investigations on the long-term behavior of Ferden and Roggiasca dams in Switzerland. The purpose of this study was to detect any changes in the dam behavior both before the snowfall and after the break period. During the 5 week long period the temperature within the concrete and reservoir level had varied so that a careful evaluation of the exceptional loading conditions was needed. A deterministic tool called MIC based on probabilistic and deterministic models was developed to carry out the evaluation of these two dams. This too was used for continuous comparison of the measured dam behavior to expected behavior of these structures. Probabilistic model was used for monitoring long-term behavior of dam while deterministic models were based on measured-expected using a structural model which considered static and thermal effects. Results show that crest dam displacements of 11 mm had occurred after the snow fall on Ferden dam. To assess the long-term behavior of the Roggiasca dam accurately, MIC was used to plot the development of reference deformation over a long period of 20 years. The authors concluded that the advanced deterministic approach led to reliable explanations of and solutions to extraordinary situations.



Bianchi و [7] Bremen روشهایی را برای انجام تحقیقات در مورد رفتار طولانی مدت سدهای فردن و Roggiasca در سوئیس ارائه دادند. هدف از این مطالعه ، شناسایی هرگونه تغییر در رفتار سد قبل از بارش برف و بعد از دوره وقفه است. در طول مدت ۵ هفته ، دمای داخل بتن و سطح آب مخزن متغیر بوده است به طوری که بک ارزیابی دقیق از شرایط بارگذاری سازه نیاز است. ابزار موثری به نام MIC بر اساس مدل های احتمالاتی و قطعی برای انجام ارزیابی این دو سد تهیه شده است. همچنین این ابزار برای مقایسه مداوم رفتار اندازه گیری شده سد با رفتار مورد انتظار این سازه ها مورد استفاده قرار گرفت. از مدل احتمالاتی برای نظارت بر رفتار بلند مدت سد استفاده شده است ، در حالی که مدل های قطعی که بر اساس حدود داده های مورد انتظار شکل گرفته است، با استفاده از یک مدل سازه ای که اثر استاتیک و گرمایی را در نظر گرفته شده است ، ایجاد شده است. نتایج نشان می دهد در سد فردن جابجایی تاج سد به میزان ۱۱ میلی متر پس از ریزش برف رخ داده است. برای ارزیابی دقیق رفتار بلند مدت سد Roggiasca ، از ابزار MIC برای ترسیم تغییرات تغییر شکل های نقطه مرجع در طی یک دوره طولانی ۲۰ ساله استفاده شد. نویسندگان نتیجه گرفتند که رویکرد استفاده از مدل قطعی پیشرفته منجر به ارائه توضیحات مطمئن تری و راه حلهای جامع تری در مواقع بحرانی می شود.

Behrouz [8] analyzed strain data collected for 17 months from Idukki dam in India. The hydrostatic-season-time (HST) model was used to model and predict the future strains of the dam. Multiple linear regression analysis was used to determine the dependency of the maximum strains with the reservoir level, time and ambient temperature. Principal component analysis was used to detect any outliers hence identifying any anomalies in the reference model and for subsequent comparison of future values to the model. The author concluded that the HST model explained a large portion of variances and is accurate in predicting strains.

بهروز [۸] داده های کرنش جمع آوری شده به مدت ۱۷ ماه از سد Idukki در هند را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. از مدل هیدرواستاتیک-فصل-زمان (HST) برای مدل سازی و پیش بینی کرنش های آینده سد استفاده شده است. برای تعیین وابستگی کرنش های حداکثری به سطح آب مخزن ، زمان و دمای محیط از آنالیز رگرسیون خطی چندگانه استفاده شد. از آنالیز مؤلفه های اصلی برای شناسایی هرگونه ناهنجاری در مدل مرجع و برای مقایسه مقادیر آینده با مدل استفاده شد. نویسنده نتیجه گرفته است که مدل HST بخش بزرگی از تغییرات را توضیح داده و در پیش بینی کرنش ها دقیق است.

Pytharouli and Stiros [11] analyzed geodetic monitoring data for the long term behavior of Landon dam in Western Greece. Horizontal and vertical displacements were measured for a period of more than 30 years used in the analysis of Landon dam. Discrete Fourier transform and Lomb normalized period gram methods were used to investigate if both dam deformation and reservoir level fluctuations corresponded to periodic functions of the same period. Results showed that for periods greater than 30 years long, during which floods and earthquakes occurred, Ladon dam retained their structural integrity and their deformation was kept at low levels.

Pytharouli و [11] Stiros داده های مانیتورینگ ژئودزیکی را برای رفتار طولانی مدت سد لاندون در یونان غربی آنالیز کردند. جابجایی های افقی و عمودی برای یک دوره بیش از ۳۰ سال مورد استفاده در تجزیه و تحلیل سد لاندون اندازه گیری شد. از روشهای تبدیل فوریه و روش Lomb برای بررسی اینکه آیا تغییر شکل سد و نوسانات سطح مخزن با توابع دوره ای همان دوره زمانی مطابقت دارند استفاده شد. نتایج نشان داد که برای دوره های طولانی تر از ۳۰ سال ، که در طی آن سیل و زلزله رخ داده است ، سد لادون یکپارچگی ساختاری خود را حفظ کرده و تغییر شکل آنها در سطح پایین نگه داشته شده است.

Chouinard et al. [12] demonstrated the benefits of multivariate statistical analysis to study the long term behavior of Daniel Johnson dam. The purpose of the study was to estimate the components of the behavior of the dam and determine the significance, extent and type of irreversible displacements for 9 years. The hydrostatic season time (HST) model was used to perform the statistical analysis. Using principal component analysis, investigations of dependencies between displacements over the entire structure were done. Results showed that the thermal effects, response to reservoir water level and the irreversible effects are the three main components of displacements.

Chouinard و همکاران. [۱۲] فواید آنالیز آماری چند متغیره را برای مطالعه رفتار بلند مدت سد دانیل جانسون نشان داد. هدف از این مطالعه برآورد مؤلفه های رفتار سد و نیز تعیین اهمیت، میزان و نوع جابجایی های برگشت ناپذیر در مدت ۹ سال، بوده است. از مدل زمان هیدرواستاتیک (HST) برای انجام آنالیز آماری استفاده شد. با استفاده از تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی، بررسی وابستگی های احتمالی بین میزان جابجایی ها در کل سازه انجام شد. نتایج نشان داد که اثرات حرارتی، سطح آب مخزن و اثرات برگشت ناپذیر، سه مؤلفه اصلی موثر بر جابجایی ها هستند.



De Sortis and Paoliani [13] compared statistical and structural identification techniques in dam monitoring. Air mean daily temperature, reservoir water level and crest deformations spanning over 40 years were considered for structural health assessment of Ancipa dam. Structural identification was performed to obtain the relationship between external loads and crest displacements using numerical models. Results showed that the thermal contribution estimated with the structural identification procedure followed the air temperature cycles more closely than that estimated with statistical analysis, in which a sinusoidal behavior has been estimated. The study concluded that the structural identification procedure provided a higher degree of accuracy in predicting the future behavior of the structure and could be used in investigating structural defects and ageing of dams.

De Sortis و Paoliani [13] تکنیک های شناسایی آماری و سازه ای را در پایش سد مقایسه کردند. برای ارزیابی سلامت سازه سد آنسیپا، میانگین دمای روزانه هوا، سطح آب مخزن و تغییر شکل دهانه تاج در طول ۴۰ سال مد نظر قرار گرفته شد. روش شناسایی سازه ای برای به دست آوردن رابطه بین بارهای وارده خارجی و جابجایی تاج با استفاده از مدل های عددی انجام شد. نتایج نشان داد که سهم دمایی تخمین زده شده با روش شناسایی سازه ای، چرخه های موجود دمای هوا محیط را از دقیق تر از آنچه که با روش آماری تخمین زده شده، دنبال می کند. این مطالعه نتیجه گیری کرد که روش شناسایی سازه ای از دقت بالاتری در پیش بینی رفتارهای آینده سازه برخوردار است و می تواند در بررسی نقایص سازه و طول عمر سدها مورد استفاده قرار گیرد.

Perner and Obernhuber [14] analyzed the deformations of Zillergrund larch dam in Austria based on a hybrid model which combines the structural analyses with statistical models. The hybrid model was developed based on deformations measured for 19 years. Structural models were employed to identify the physical relations between deformations and water load and between the deformation and thermal load. Authors concluded that the hybrid model had an advantage of having good predictions with only a small number of parameters for statistical analysis and that it provided a reasonable separation of various factors of influence.

Perner و Obernhuber [14] تغییر شکل سدی در اتریش را بر اساس یک مدل ترکیبی که ترکیبی از آنالیز سازه ای با مدل های آماری است، مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. مدل ترکیبی بر اساس تغییر شکل ۱۹ سال اندازه گیری شد. از مدل های سازه ای برای شناسایی روابط فیزیکی بین تغییر شکل های سازه و میزان بارهیدرولیکی آب و همچنین روابط بین تغییر شکل ها و بارهای حرارتی استفاده شد. نویسندگان نتیجه گرفتند که مدل ترکیبی تنها با تعداد کمی از پارامترها میتواند نتایج خوبی در پی داشته باشد می تواند تفکیک منطقی از عوامل مختلف تأثیرگذار را فراهم می کند.

Mata [15] compared two statistical models namely multiple linear regression (MLR) and neural network (NN) models for characterization of Alto Rabago dam behavior under environmental loads of reservoir level and external temperature of structural responses (crest displacements). Displacements at any point of the dam were strongly related to the corresponding variation in water level in the reservoir. The observations were used for the computation of the MLR and NN models. MLR and NN models were generated and calibrated on the basis of experimental data time histories (over 25 years) of reservoir level and external temperatures and of crest displacements. The NN model showed flexibility and proved to be more adequate for months with extreme temperatures than the MLR model.

ماتا [۱۵] برای توصیف رفتار سد آلتو رباگو تحت بارهای محیطی شامل سطح آب مخزن و دمای خارجی و پاسخ های سازه ای (جابجایی های تاج سد) دو مدل آماری یعنی رگرسیون چند خطی (MLR) و شبکه عصبی (NN) را مقایسه کرد. جابجایی ها در هر نقطه از سد به شدت با تغییرات سطح آب در مخزن مرتبط بود. مشاهدات برای محاسبه مدل های MLR و NN استفاده شده است. مدل های MLR و NN بر اساس تاریخچه داده های تجربی (بیش از ۲۵ سال) از سطح آب مخزن و دمای خارجی و جابجایی تاج سد اصلاح و کالیبره شدند. مدل NN ثابت کرد که برای ماه های سال با درجه حرارت شدید نسبت به مدل MLR مناسب تر است.

Loh et al. [16] developed advanced statistical methods for extracting trends from long term structural health monitoring data and try to set an early warning threshold level based on the results of the analyses of Fei-Tsui dam in Taiwan. The daily-based dam deformation data at one sample per day and the temperature data were measured for a period of 22 years. Data was analyzed using the singular spectrum analysis with auto regressive model (SSA-AR) and the nonlinear principal component analysis (NPCA) using auto-associative neural network method (AANN). It was concluded that the AANN method could capture the periodic variations (temperature, season) as well as the trends (creep). This made the AANN model suitable for a long term trend prediction as compared to the SSA-AR model which can only be applied for short time prediction.

لوه و همکاران [۱۶] روش های آماری پیشرفته ای را برای استخراج روندها از داده های بلند مدت پایش سلامت سازه ای ایجاد کرده و سعی کردند تا یک سطح آستانه هشدار اولیه را بر اساس نتایج حاصل از تحلیل سد فی-تسوی در تایوان تنظیم کنند. داده های روزانه تغییر شکل سد مبتنی و داده های دما برای یک دوره ۲۲ ساله اندازه گیری شد. داده ها با استفاده از آنالیز طیف منفرد با مدل رگرسیون خودکار (SSA-AR) و آنالیز مؤلفه اصلی غیرخطی (NPCA) با استفاده از روش شبکه

عصبی خودکار وابسته (AANN) تجزیه و تحلیل شد. نتیجه گیری شد که روش AANN می تواند تغییرات دوره ای (دما، فصل) و همچنین رویه ها (خزش) را ثبت کند. این امر مدل AANN را برای یک پیش بینی روند طولانی مدت نسبت به مدل SSA-AR که فقط برای پیش بینی زمان کوتاه قابل استفاده است، مناسب کرد.

Popescu [17] carried out dam monitoring and surveillance using blind source separation on Vidraru dam in Romania for a period of 1,200 days. This study was carried out with an objective of finding out contributions of the external loads namely: air temperature and hydrostatic pressure on structural deformation and separate these external loads of the dam and the time effects without prior knowledge of the propagation environment. Second order blind source separation (BSS) algorithm was used to determine the independent sources and identify the irreversible component in the structural response of the dam. Results indicated that the blind source separation method was efficient in dam monitoring.

Popescu [17] با استفاده از جداسازی منبع کور روی سد Vidraru در رومانی برای یک دوره ۱۲۰۰ روز نظارت و پایش سد را انجام داد. این مطالعه با هدف یافتن سهم بارهای خارجی از جمله: درجه حرارت هوا و فشار هیدرواستاتیک بر تغییر شکل سازه ای انجام شده و اثرات این بارهای خارجی بر روی سد و اثرات زمانی را بدون اطلاع قبلی از شرایط محیط جدا می کند. از الگوریتم جداسازی منبع کور مرتبه دوم (BSS) برای تعیین منابع مستقل و شناسایی مؤلفه برگشت ناپذیر در پاسخ سازه ای سد استفاده شده است. نتایج نشان داد که روش جداسازی منبع کور در پایش سد کارایی دارد.

Henriques et al. [18] presented results of the collected data, namely inclination, temperature and reservoir level. The inclination measurements were taken in connection with a test on a fully automated geodetic system for continuous monitoring of displacements. Using regression models, a good correlation was observed between the variations in the inclination with temperature and with changes in the reservoir level of Cabril dam. Inclination measurements were conducted for 2 days during which temperature was also measured on the downstream of the face of the dam. The study showed that temperature and water level had an influence on the structural behavior of the dam. Authors noted that there were some variations in the components of the inclination, which cannot be explained by the regression models used.

هنریکس و همکاران [۱۸] نتایج داده های جمع آوری شده، یعنی خمیدگی، دما و سطح مخزن را ارائه می دهد. اندازه گیری خمیدگی در ارتباط با یک آزمایش بر روی یک سیستم ژئودزی کاملاً خودکار برای پایش مداوم بر جابجایی ها انجام شد. با استفاده از مدل های رگرسیون، ارتباط خوبی بین تغییرات در شیب خمیدگی با دما و تغییر در سطح مخزن سد کابل مشاهده شد. اندازه گیری شیب خمیدگی به مدت ۲ روز انجام شد که طی آن دما نیز در قسما پایین دست سد اندازه گیری شد. این مطالعه نشان داد که دما و سطح آب در رفتار سازه ای سد تأثیر دارد. نویسندگان خاطرنشان کردند که در مؤلفه های خمیدگی تغییرات زیادی وجود دارد که با مدل های رگرسیون مورد استفاده قابل توضیح نیست.

Demirkaya and Balcilar [19] compared two statistical methods namely multiple linear regression (MLR) and multiple layer perceptron (MLP) models to construct a daily displacement forecasting system of Schlegeis arch dam. Benchmark data were water level, air temperature and concrete temperatures at six points—one value per day for 8 years. The observed displacements of the dam were analyzed using time histories of water level and concrete temperatures as input parameters. According to the analysis, MLR exhibited a better performance under the criteria of  $R^2$  as compared to MLP's  $R^2$ . Results indicated that linear regression provided the most appropriate solution of linear problems and acceptable in static monitoring of dams.

Demirkaya و Balcilar [19] برای طراحی یک سیستم پیش بینی جابجایی روزانه سد قوسی شلزئیس، دو روش آماری یعنی رگرسیون چندگانه خطی (MLR) و مدل های چند لایه پرسپترون (MLP) را مقایسه کردند. داده های معیار شامل: سطح آب، دمای هوا و دمای بتن در شش نقطه - و در نهایت یک کمیت در روز به مدت ۸ سال بود. جابجاییهای مشاهده شده سد با استفاده از تاریخچه زمانی سطح آب و دمای بتن به عنوان پارامترهای ورودی مورد بررسی قرار گرفت. طبق تجزیه و تحلیل، MLR در مقایسه با MLP عملکرد بهتری را تحت معیارهای  $R^2$  به نمایش گذاشت. نتایج نشان داد که رگرسیون خطی مناسب ترین راه حل مشکلات خطی و قابل قبول در پایش استاتیک سدها را نشان می دهد.

Mata [20] identified the effect of the daily variation of air temperature on the structural response of Alto Lindoso dam. The Short Time Fourier Transform (STFT) method was used to identify the influence of the daily variation of air temperature on the horizontal displacement of concrete dams and track its variation as a function of time which can be used to validate new observations. Data used in this study corresponded to a period between October 2008 and September 2011 with samples collected every hour. The amplitude of the horizontal displacement was modelled as a function of the amplitude of air temperature by a linear regression model after a strong correlation was verified. Results showed that a better correlation between the magnitudes was obtained when the phase of the horizontal displacement is more regular.

ماتا [۲۰] اثر تغییر روزانه دمای هوا را در پاسخ سازه ای سد آلتو لیندوسو مشخص کرد. از روش تبدیل زمان - کوتاه فوریه (STFT) برای شناسایی تأثیر تغییر روزانه دمای هوا بر جابجایی افقی سدهای بتنی و نیز دنباله سازی تغییرات آن به عنوان تابعی از زمان استفاده شده است که می توان از آن برای صحت سنجی مشاهدات جدید مورد استفاده قرار گیرد. داده های مورد استفاده در این مطالعه مربوط به دوره ای بین اکتبر ۲۰۰۸ و سپتامبر ۲۰۱۱ با نمونه برداری در هر ساعت می باشد.



دامنه جابجایی افقی به عنوان تابعی از دامنه دمای هوا توسط یک مدل رگرسیون خطی که دارای یک همبستگی قوی بود، مدل شد. نتایج نشان داد که وقتی فاز جابجایی افقی منظم تر است، ارتباط بهتری بین مقادیر بدست می آید.

In summary, static monitoring of dams has been used for decades with the aim of investigating the contribution of external loads to structure deformation and identify irreversible components in the structural response. Parameters such as ambient temperature, displacements, reservoir water level to mention but a few. A lot of data is obtained from the measurements which require interpretation to get meaningful information. Statistical and deterministic models have been developed to analyze the large data obtained from the monitoring programs. Statistical models have been widely used as seen in the literature because they are simple in formulation and able to provide a correlation between governing and dependent parameters. Examples of these models include HST, multivariate statistical analysis (MLR, PCA, ANN, and SSAAR). Other techniques that have been used in data interpretation of static monitoring data recently include BSS and STFT analysis. This shows that there is advancement in the area of static monitoring of dams all over the world. Table 1 summaries the methods of analysis, their principle, advantages and limitations plus the name and type of dam in static monitoring.

به طور خلاصه، با هدف بررسی سهم بارهای خارجی در تغییر شکل سازه و شناسایی مولفه های غیر قابل برگشت در پاسخ سازه، از پایش استاتیک سدها استفاده شده است. پارامترهایی از قبیل دمای محیط، جابجایی ها، سطح آب مخزن برای چند مورد ذکر شد. داده های زیادی از اندازه گیری هایی که نیاز به تفسیر دارند برای بدست آوردن اطلاعات معنی دار بدست می آیند. مدل های آماری و قطعی برای تجزیه و تحلیل حجم بسیار زیاد داده ها در برنامه های پایش تهیه شده اند. مدل های آماری همانطور که در مقالات مشاهده می شود بسیار مورد استفاده قرار گرفته است زیرا در فرمول بندی ساده هستند و قادر به ایجاد ارتباط همبستگی بین پارامترهای حاکم و وابسته هستند. نمونه هایی از این مدل ها شامل HST، آنالیز آماری چند متغیره (MLR)، PCA، ANN و SSAAR است. تکنیک های دیگری که اخیراً در تفسیر داده ها از داده های مانیتور استاتیک استفاده شده است شامل تجزیه و تحلیل BSS و STFT می باشد. این نشان می دهد که پیشرفت در زمینه پایش استاتیکی سدها در سراسر جهان وجود دارد. در جدول ۱ روشهای تحلیل، اصول آنها، مزایا و محدودیتهای آنها به همراه نام و نوع سد در پایش استاتیک خلاصه شده است.

### 3 Dynamic monitoring of dams

As part of ICOLD recommendations, the performance of dams under vibrations has to be evaluated [21]. These vibrations are may be due to wind, water waves and ground motions. Structural properties such as stiffness, damping of dams are affected by these vibrations. Although these properties can be modelled using finite element methods, the real behaviors of these structures need to be verified using field tests. Field tests facilitate the estimation of dynamic properties also commonly known as modal parameters namely: resonant frequencies, damping ratio and mode shapes. There exist basically two field tests available for testing the behavior of dams under vibrations. These include (1) forced vibration testing (FVT) and (2) ambient vibration testing (AVT).

به عنوان بخشی از توصیه های ICOLD، عملکرد سدهای تحت لرزش باید ارزیابی شود [۲۱]. این ارتعاشات ممکن است ناشی از باد، امواج آب و حرکات زمین باشد. مشخصات سازه ای مانند سختی، میرایی سدها در اثر این ارتعاشات تحت تأثیر قرار می گیرند. اگرچه می توان با استفاده از روشهای اجزاء محدود این خصوصیات را مدل سازی کرد، اما رفتارهای واقعی این سازه ها با استفاده از تست میدانی قابل تأیید است. آزمایش های میدانی تخمین مشخصات دینامیکی را که معمولاً به عنوان پارامترهای مودال شناخته می شوند تسهیل می کنند: فرکانس رزونانس، نسبت میرایی و اشکال مودی. اساساً دو آزمایش میدانی برای آزمایش رفتار سدها تحت ارتعاش وجود دارد که شامل (۱) آزمایش ارتعاش اجباری (FVT) و (۲) آزمایش ارتعاش محیطی (AVT) است.



In the forced vibration tests, dams are excited by mechanical means using shakers and the vibration responses are measured by accelerometers. With the force signal acting as a reference to all response signals, dynamic properties of the dam are extracted using frequency response functions (FRFs). FVT were the first field tests to be conducted on dams with the aim of understanding the dynamic behavior of dams, validation and calibration of numerical models. For example, Severn [22] conducted forced vibration tests on Wembley buttress dam with the aim of determining the effect of rising water level to the structural behavior of dams. Artificial excitation was caused by rotating eccentric mass (REM) exciters placed at the crest of the dam. Resonant frequencies in the range 8.9–9.6 Hz were estimated from resonant peaks. Results indicated that the rise in water level caused a fall in resonant frequencies and the buttresses did not act independently from each other for small amplitudes of motions generated by the exciters. Clough et al. [23] used field measurements in the updating of finite element model of Xiang Hong Dian dam. Forced vibration tests were carried out using eccentric mass shakers. Accelerometers were placed on both the dam crest and the foundation on the downstream face of the dam. Then 12 fundamental modes in the range 4–12 Hz were obtained from frequency response curves. The authors concluded that field measurements correlated well with analytical predictions. Cantieni et al. [24] created and updated a finite element model using field results on Norsjo dam in Sweden. The servo hydraulic shaker was used to mechanically excite the dam. Dam responses in term of accelerations were measured in three directions at the dam crest. Using the least square complex exponential (LSCE) algorithm, resonant frequencies in the range 3.55–12.9 Hz were determined. For more literature on forced vibration testing of dams see Refs. [25, 26].

در آزمایشات ارتعاش اجباری، سدها با استفاده از ابزارهای مکانیکی مانند شیکرها مرتعش می شوند و پاسخ ارتعاش توسط شتاب سنج اندازه گیری می شود. با استفاده از اثر سیگنال نیرو به عنوان ورودی برای تمام سیگنال های پاسخ، خصوصیات دینامیکی سد با استفاده از توابع پاسخ فرکانس (FRF) استخراج می شوند. FVT اولین نوع آزمایشات میدانی بود که با هدف درک رفتار دینامیکی سدها، اعتبار سنجی و کالیبراسیون مدل های عددی روی سدها انجام شد. به عنوان مثال، Severn [22] با هدف تعیین تأثیر افزایش سطح آب بر رفتار سازه ای سدها، آزمایش ارتعاش اجباری را روی سد کمربندی Wembley انجام داد. این ارتعاش مصنوعی در اثر چرخش جرمهای خارج از مرکز (REM) که در قسمت تاج سد قرار گرفته اند ایجاد شده است. فرکانس های رزونانس در محدوده ۸٫۹–۹٫۶ هرتز برآورد شد. نتایج نشان داد که افزایش سطح آب باعث کاهش فرکانسهای رزونانس شده است و در حالت دامنه های کوچک ارتعاش ایجاد شده توسط محرک ها، شمع های پشتیبان سازه به طور مستقل از یکدیگر عمل نمیکنند. Clough و همکاران [۲۳] در به روزرسانی مدل المان محدود سد شیانگ دیان از اندازه گیری های میدانی استفاده کرد. آزمایش ارتعاش اجباری با استفاده از شیکرهای جرمی خارج از مرکز انجام شد. شتاب سنج ها در هر دو طرف تاج سد و روی پی در قسمت پایین دست سد قرار گرفته اند. سپس ۱۲ مود اصلی در محدوده ۴–۱۲ هرتز از منحنی پاسخ فرکانس بدست آمد. نویسندگان نتیجه گرفتند که اندازه گیری های میدانی با پیش بینی های تحلیلی همبستگی خوبی دارد. کانتی و دیگران [۲۴] با استفاده از نتایج میدانی در سد نورسجو در سوئد، یک مدل المان محدود ایجاد و به روز کردند. از شاکر هیدرولیک سروو برای ایجاد ارتعاش سد استفاده شده است. پاسخ سد در قابل پارامتر شتاب در سه جهت در تاج سد اندازه گیری شد. با استفاده از الگوریتم LSCE، فرکانسهای رزونانس در محدوده ۳٫۵۵–۱۲٫۹ هرتز بدست آمد. برای اطلاعات بیشتر در مورد آزمایش ارتعاش اجباری سدها، رجوع کنید به مقاله [۲۵، ۲۶].





Table 1 Methods of analysis, features and name of the dam as applied in static monitoring

Method of analysis	Principle	Advantages	Limitations	Name (type) of dam
Deterministic model	Compares the actual behavior of the structure to the theoretical behavior	Used for long term monitoring of the structure	Theoretical model may not be correct	Ferden arch dam Roggiasca arch dam
Hydrostatic-seasontime model	Takes into account the hydrostatic level as a fourth degree polynomial, the seasonal effects as a sum of four trigonometric functions and irreversible effects as a combination of exponential and polynomial functions of time	Easy to implement useful in small dams where the effect of the temperature in the displacements is	Dependence on the cyclic evolution of the external thermal loads	Idduki arch dam Daniel Johnson arch dam
Discrete fourier transform	Decomposes time series signal into frequency components each having amplitude and phase	Gives information about periodic components	Data has to be uniformly distributed	Landon gravity dam
Lomb normalised periodogram	Estimates the frequency spectrum based on least squares fit of sinusoids to data samples	Can handle long periodic noise in long gapped records	Time consuming	Landon gravity dam
Multiple linear regression	Models the linear relationship between dependent variable and various independent variables	Simple to use Speed of execution	Does not take into account non-linearity	Ancipa gravity dam Schlegeis arch dam Cabril arch dam Idduki arch dam Zillergreundl arch dam Alto Rabago arch dam
Short time fourier transform	Breaks the signal into small time segments and performs Fourier analyses of each time segment to ascertain frequencies that exist in it	Can handle non stationary signals	Requires experienced user	Alto Lindoso arch dam
Multi-layer perceptron	Based on forward artificial neural network model that maps sets of input data onto a set of appropriate output	Detects trends that are complex to see	Requires experienced user	Schlegeis arch dam Alto Rabago arch dam
Blind source separation	Separates a set of source signals from a set of mixed signals without aid of information about the source signals	Low computation complexity	Source of ambiguity	Vidraru arch dam
Principal component analysis	Uses the dependencies between variables to represent it in a more tractable, lower-dimensional form without losing much information	Identifies patterns Data compression	Sensitive to noise	Daniel Johnson arch dam Idduki arch dam
Singular spectrum analysis with auto regressive model	Based on multivariate statistics of decomposing a signal into a sum of several principal component time series	Eliminates the effect of noise	Time consuming	Fei Tsui arch dam
Nonlinear principal component analysis using autoassociative neural network method	Multivariate data analysis method that uses dimensionality reduction, visualization, and exploratory data analysis to identify and remove correlations among problem variables	Handles nonlinear relationships between variables Compresses data	Computationally expensive	Fei-Tsui arch dam
Structural identification technique	Based on experimental measurements in terms of an input–output data stream of unknown system are used to model the system mathematically	Higher degree of accuracy in predicting the future	Does not consider nonlinearity	Landon gravity dam

Dams tend to be located in remote areas where accessibility might be a problem and the transportation of the mechanical exciters to site become very complicated and expensive. In such cases, AVT becomes the only practical means of carrying out dynamic tests on dams. In ambient vibration testing also known as operational modal analysis, only responses from the structure are measured and it uses environmental forces (wind, ground motion) to excite the structure. Instead of using the force signal as a reference, the response signal measured at one or more points (often called reference points) is used while estimating the dynamic properties. AVT has advantages over FVT, i.e. it is cheaper and the structure is tested in its operating conditions. Further developments in data acquisition and efficient methods in either frequency and time domain methods available to process signals from ambient vibration tests [27, 28] has made AVT a preferable method in SHM of dams.

سدها معمولاً در مناطق دور افتاده واقع میشوند که دسترسی به آن ممکن است مشکلی باشد و حمل و نقل محرک های مکانیکی به محل بسیار پیچیده و گران باشد. در چنین مواردی، AVT تنها وسیله عملی برای انجام آزمایش های دینامیکی در سدها می باشد. در آزمایش ارتعاش محیطی که به عنوان آنالیز مودال عملیاتی نیز شناخته می شود، فقط پاسخ های سازه اندازه گیری می شود و برای تحریک سازه از نیروهای محیطی (باد، حرکت زمین) استفاده می کنند. در این روش به جای استفاده از سیگنال نیرو به عنوان یک مرجع ورودی، از سیگنال پاسخ اندازه گیری شده در یک یا چند نقطه (که اغلب به آن نقاط مرجع گفته می شود) برای بدست آوردن خصوصیات دینامیکی سازه استفاده می شود. AVT نسبت به FVT دارای مزایایی است مثلاً ارزان تر است و سازه می تواند تحت شرایط عملیاتی خود مورد آزمایش قرار گیرد. پیشرفت های زیاد در سیستم جمع آوری داده ها و روش های کارآمد پردازش سیگنال در هر دو روش فرکانس و زمان دامنه باعث شده است که روش پردازش سیگنال آزمایش ارتعاش محیطی [27، 28] AVT یک روش ارجح در SHM سدها باشد.

The first reported attempt to conduct ambient vibration tests on dam was on Contra dam in Switzerland [29]. The objective of the study was to investigate the feasibility of ambient vibration testing of dams. Force balanced accelerometers placed on the crest of the dam were used to measure vibrations. Natural frequencies were determined by picking peaks on the auto-spectrum while the mode shapes were obtained from the output only transfer functions between the travelling and reference accelerometers. Eight upstream–downstream modes were extracted in the frequency range 1.8–4.2 Hz. Test results showed that the natural frequencies of the measured models increased with the decline in the reservoir level and the excitation process was directly related to hydroelectricity generating activity.

اولین تلاش گزارش شده برای انجام آزمایشات ارتعاش محیطی بر روی سد، روی سد کنتررا در سوئیس بود [29]. هدف از این مطالعه بررسی و امکان سنجی آزمایش لرزش محیطی سدها بود. از شتاب سنجهای متوازن نیرو که بر روی تاج سد قرار گرفته شدند برای اندازه گیری ارتعاشات استفاده شد. فرکانسهای طبیعی توسط روش picking peaks بر روی طیف خودکار مشخص شد این در حالی است که اشکال مودی فقط از خروجی و توابع انتقال بین شتاب سنجهای متحرک و مرجع تعیین می شوند. هشت مود بالادست - پایین دست در محدوده فرکانس ۱٫۸-۴٫۲ هرتز استخراج شد. نتایج آزمون نشان داد که فرکانسهای طبیعی مدل های اندازه گیری شده با کاهش سطح مخزن افزایش یافته و فرایند تحریک محیطی مستقیماً با فعالیت نیروگاه برق آبی مرتبط بوده است.

Brownjohn [30] investigated the safety and stability of Hermitage dam, a concrete gravity dam located on the Wag River, Kingston, Jamaica. Field results were used to validate a finite element model of the dam. Natural frequencies in the range of 7–30 Hz picked from peaks of the auto spectra were compared with the analytical natural frequencies obtained from the finite element model of the dam. The report concluded that although there were some discrepancies between the predictions of the mathematical model and the experimental results, the agreement was good enough to justify the usage of the mathematical model.

Brownjohn [30] در مورد ایمنی و پایداری سد هرمتاژ، سد وزنی بتونی واقع در رودخانه واگ، کینگستون، جامائیکا تحقیق کرد. از نتایج میدانی برای اعتبارسنجی یک مدل المان محدود سد استفاده شد. فرکانسهای طبیعی در دامنه ۷ تا ۳۰ هرتز از روش PP بدست آمد با فرکانس های طبیعی تحلیلی به دست آمده از مدل المان محدود سد مقایسه شد. این گزارش نتیجه گرفت که اگرچه بین پیش بینی های مدل ریاضی و نتایج آزمایش های میدانی اختلافاتی وجود دارد، اما نتایج به اندازه کافی خوب بود که بتوان استفاده از مدل ریاضی را توجیه کرد.

Loh and Wu [31] obtained the dynamic characteristics of the dam using seismic response data and ambient vibration data of Fei-Tsui dam in Taiwan. The modal parameters were extracted for the upstream–down direction. Random decrement method and auto regressive model with least-squares method were used to estimate modal parameters of the dam. Two modes were identified with the first and second having average frequencies of 2.49 and 3.33 Hz. Results showed that the identified natural frequencies from ambient vibration tests verified that were consistent with those from earthquake excitation.

لوه و وو [31] با استفاده از داده های پاسخ لرزه ای و داده های ارتعاش محیطی سد Fei-Tsui در تایوان، ویژگی های دینامیکی سد را به دست آوردند. پارامترهای مودال در جهت بالادست به پایین دست استخراج شد. برای تخمین پارامترهای مودال سد از روش کاهش تصادفی و مدل رگرسیون خودکار با روش حداقل مربعات



استفاده شده است. دو مود اول و دوم با فرکانس متوسط ۲,۴۹ و ۳,۳۳ هرتز شناسایی شدند. نتایج نشان داد که فرکانسهای طبیعی شناسایی شده از آزمایشات ارتعاش محیطی با موارد بدست آمده از تحریک زلزله همخوانی دارد.

Kemp [32] conducted ambient vibration tests on a Ruskin dam as part of safety evaluation studies of concrete gravity dams in British Columbia, Canada. Dynamic properties of Ruskin dam were used to calibrate a numerical model of the dam. Natural frequencies in the range 6.5–14 Hz for the high reservoir and 8.5–14.5 Hz for low reservoirs were obtained from the peaks of average normalized power spectral densities (ANPSDs).

کمپ [۳۲] آزمایش ارتعاش محیطی را روی سد Ruskin به عنوان بخشی از مطالعات ارزیابی ایمنی سدهای وزنی - بتونی در بریتیش کلمبیا ، کانادا انجام داد. در این مطالعه از خصوصیات دینامیکی سد Ruskin برای کالیبراسیون مدل عددی سد استفاده شده است. فرکانسهای طبیعی در محدوده ۶,۵-۱۴ Hz برای مخزن با سطح بالای آب و ۸,۵-۱۴,۵ هرتز برای مخزن کم آب از طریق روش (ANPSDs) بدست آمد.

Danielle and Taylor [9] presented results of ambient vibration tests for purposes of validating a finite element model for the dam-reservoir foundation system of Claewern dam. Force balanced accelerometers mounted on steel blocks on the dam crest were used to acquire the signals. Natural frequencies were picked from the peaks of average normalized power spectral densities. Six lateral modes were identified in the frequency range 6.1–11.8 Hz. The computed mode shapes and natural frequencies from the finite element analysis compared well with the experimental results. The study demonstrated that ambient vibration testing can offer a viable alternative to forced vibration testing when only the modal properties of a dam are required.

دانیل و تیلمور [۹] نتایج آزمایش ارتعاش محیطی را به منظور اعتبارسنجی مدل المان محدود برای مجموعه فونداسیون و مخزن سد کلورین ارائه دادند. شتاب سنج های متعادل نیرو که بر روی بلوک های فلزی روی تاج سد سوار شده اند ، برای به دست آوردن سیگنال ها استفاده شدند. فرکانسهای طبیعی از پیک های متوسط چگالی طیفی اندازه گیری شد. شش مود جانبی سازه در محدوده فرکانس ۶,۱-۱۱,۸ هرتز مشخص شد. اشکال مودی محاسبه شده و فرکانسهای طبیعی حاصل از آنالیز مدل المان محدود با نتایج آزمون های میدانی و تجربی مقایسه شدند. این مطالعه نشان داد که آزمایش ارتعاش محیطی می تواند جایگزینی مناسبی برای آزمایش ارتعاش اجباری باشد در حالی که فقط خصوصیات مودال سد مورد نیاز است.

Darbre et al. [33] investigated the effect of various reservoir levels on natural frequencies of the arch dam of Mauvoisin in Switzerland. Ambient vibration tests on Mauvoisin dam marked the beginning of long term ambient vibration monitoring of dams. Seven ambient vibration tests at different water levels were carried out between 1995 and 1996. An automated system was set up on the dam and ambient vibrations were recorded twice daily for 6 months. Natural frequencies were obtained by peak picking on normalized power spectral densities of individual acceleration. Results showed that the natural frequencies initially increased with rising water level and then decreased with further rise. This was contributed to the two competing features of increasing mass of water (reduction of natural frequencies) and of dam stiffening due to closing of vertical construction joints.

دارب و همکاران. [۳۳] در مورد تأثیر سطوح مختلف آب مخزن بر فرکانسهای طبیعی سد قوس ماوووینین در سوئیس بررسی مطالعه کرده اند. آزمایش ارتعاش محیطی روی سد ماوووینین ، آغازی برای پایش بلند مدت سدها با روش ارتعاش محیطی است. هفت آزمایش ارتعاش محیطی در سطوح مختلف آب بین سالهای ۱۹۹۵ و ۱۹۹۶ انجام شد. یک سیستم خودکار پایش روی سد نصب شد و ارتعاشات محیطی دو بار در روز به مدت ۶ ماه ثبت شده است. فرکانسهای طبیعی با روش پیک پیکینگ در چگالی طیفی حاصل از داده های شتاب بدست آمد. نتایج نشان داد که در ابتدا فرکانسهای طبیعی با افزایش سطح آب افزایش یافته و با افزایش بیشتر کاهش می یابد. این موضوع حاصل از رقابت دو ویژگی، یکی افزایش جرم آب (کاهش فرکانس های طبیعی) و دیگری افزایش سختی سد به دلیل بسته شدن اتصالات عمودی است.

Mivehchi and Ahmadi [34] carried out ambient vibration tests on Shahid-Rajae and Saveh dams, two concrete arch dams in Iran. The purpose of the tests was to verify the results obtained from mathematical model used regularly in the Iranian dam design practice by comparing with the behavior of the actual as-built structures. The ambient tests were conducted during winter of 1999 to autumn of 2000. Partial and rapid opening and closing of the bottom outlet gates of the dam body provided artificial excitation during the ambient vibration tests. These were helpful in exciting any weak modes which could not be realized with ambient tests only. Modal parameters from both dams were extracted from peaks of auto spectrum. Natural frequency ranges of Shahid-Rajae and Saveh dams were reported as 1.46–3.58 and 3.91–7.91 Hz, respectively. Authors concluded that ambient vibration tests can be used in the seismic safety evaluation of other Iranian dams and also be used in the design enhancement of new dams.

میوچی و احمدی [۳۴] آزمایشات ارتعاش محیطی را روی سدهای شهید رجایی و ساوه، دو سد قوسی بتونی در ایران انجام دادند. هدف از آزمایشات، بررسی نتایج به دست آمده از مدل ریاضی مورد استفاده در آیین نامه عملیاتی طراحی سد ایران و مقایسه آن با رفتارهای سازه واقعی ساخته شده بود. آزمایش های محیطی در زمستان ۱۹۹۹ تا پاییز ۲۰۰۰ انجام شد. باز و بسته شدن سریع و تدریجی دروازه های خروجی تحتانی بدنه سد باعث تحریک مصنوعی سازه در طول تست های لرزش محیطی شد. این ارتعاشات جهت تحریک مودهای ضعیف که در حالت عادی با تست های محیطی قابل کشف نیست، مفید بودند. پارامترهای مودال هر دو سد از روش پیک پیکینگ استخراج شد. محدوده فرکانس طبیعی سدهای شهید رجایی و ساوه به ترتیب ۱٫۴۶–۳٫۵۸ و ۳٫۹۱–۷٫۹۱ هرتز گزارش شده است. نویسندگان نتیجه گرفتند که از آزمایش های ارتعاش محیطی می توان در ارزیابی ایمنی لرزه ای سایر سدهای ایرانی استفاده کرد و همچنین در ارتقاء کدهای طراحی سدهای جدید مورد استفاده قرار گیرند.

In addition, a continuous dynamic monitoring system was pioneered at Cabril arch dam in Portugal. This was after ambient vibration tests were carried out on this dam between 2000 and 2003 [35]. The results from these two tests were used for different purposes (1) demonstrate that it is possible to characterize the dynamic response of arch dams with good precision owing to the development of sensors and data acquisition systems [36], (2) investigate the influence of contraction joints on dynamic behavior of Cabril dam [37] and (3) study the influence of an intake tower dynamic behavior on modal identification of the dam [38]. Frequency domain decomposition (FDD) and stochastic subspace identification (SSI) techniques were used to extract modal parameters of the dam and also to cross validate the results. Numerical results from 3D finite element models were compared with the experimental results. Results showed that there was a need to develop a continuous monitoring system for the dam so that the finite element models would be calibrated. The performance of the different modal estimation methods on Cabril dam was not evaluated.

علاوه بر موارد فوق، یک سیستم پایش دینامیکی مداوم در سد قوس Cabril در پرتغال پیشگام این نوع پایش در سدها شد. این بعد از انجام آزمایشات ارتعاش محیطی بر روی این سد بین سالهای ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۳ انجام گرفت [۳۵]. نتایج حاصل از این دو آزمایش برای اهداف مختلف مورد استفاده قرار گرفت (۱) نشان داد که می توان با وجود توسعه سنسورها و سیستمهای جمع آوری داده، پاسخ دینامیکی سدهای قوسی را توصیف کرد [۳۶]، (۲) بررسی تأثیر اتصالات انقباضی بر رفتار دینامیکی سد کابریل [۳۷] و (۳) بررسی تأثیر رفتار دینامیکی سازه برج ورودی در شناسایی پارامترهای مودال سد [۳۸]. از تکنیک های تجزیه دامنه فرکانس (FDD) و شناسایی زیرمجموعه تصادفی (SSI) برای استخراج پارامترهای مودال سد و همچنین برای تنذیق نتایج استفاده شد. نتایج عددی حاصل از مدل های المان محدود سه بعدی سازه با نتایج تجربی حاصل از آزمون ها مقایسه شد. نتایج نشان داد که نیاز به ایجاد سیستم پایش مداوم برای سد وجود دارد تا کالیبراسیون مدل های اجزا محدود انجام شود. عملکرد روش های مختلف آنالیز مودال در سد کابریل مورد بررسی قرار نگرفت.

Okuma et al. [39] collected fundamental data for developing structural damage detection based on long term ambient vibration testing of Hitotsuse arch dam in Japan. Long term vibration testing was done to evaluate the changes of the natural frequencies of the whole dam due to macroscopic damage caused by aging effects. The measuring system was configured to record continuously at a sampling rate of 200 Hz and store data measured every after 30 min. Natural frequencies were identified from the cross spectrum of autoregressive moving average models. Results showed that the identified natural frequencies were in good agreement with the earthquake observation records, and the identified natural frequencies of three modes strongly correlated with the water level of the dam.

Okuma و همکاران [۳۹] داده های بنیادی را برای توسعه آسیب یابی سازه سد بر اساس آزمایش بلند مدت ارتعاش محیطی سد قوسی هیتوتوزه در ژاپن جمع آوری کردند. آزمایش ارتعاش طولانی مدت برای ارزیابی تغییرات فرکانسهای طبیعی کل سازه سد به دلیل آسیب ماکروسکوپی ناشی از اثرات پیری سازه انجام شد. سیستم اندازه گیری داده این طور برنامه ریزی شده بود تا بطور مداوم با نرخ نمونه گیری ۲۰۰ هرتز داده ها جمع آوری شود و داده های ذخیره شده هر ۳۰ دقیقه یکبار آنالیز شوند. فرکانسهای طبیعی از طریق روش طیف متقاطع مدل های متوسط خودکار مشخص شد. نتایج نشان داد که فرکانسهای طبیعی شناسایی شده با سوابق مشاهده شده از نتایج زلزله مطابقت خوبی دارند و فرکانسهای طبیعی شناسایی شده در سه مود به شدت با سطح آب سد همبستگی دارد.



Moyo and Oosthuizen [40] performed ambient vibration survey trials on two arch dams, namely, Roode Elsberg and Kouga located in South Africa, respectively. The major aim of the tests was to obtain dynamic characteristics of these dams to be used as baseline measurements for long term dam safety monitoring. Four sets of ambient vibration measurements were taken on Roode Elsberg dam between a period of December 2008 and April 2010 while only one measurement test in September 2009 was carried out on Kouga dam. Several operational modal analysis (OMA) methods have been compared using test data from these two dams [41, 42]. Natural frequencies of Roode Elsberg dam and Kouga dam were in the range 3–7.70 Hz and 3.72–8.30 Hz, respectively. Results showed that there was no best OMA algorithm that was suitable for dam monitoring. However, authors concluded that ambient vibration tests add value to safety surveillance of dams.

مووی و اووستوهیزن [۴۰] آزمایشات بررسی ارتعاش محیطی را در دو سد قوس ، یعنی روده السبرگ و کوگا واقع در آفریقای جنوبی انجام دادند. هدف اصلی از این آزمایشات به دست آوردن ویژگی های دینامیکی این سدها به عنوان مقادیر پایه برای پایش ایمنی بلند مدت سد ها است. چهار مجموعه آزمون ارتعاش محیطی در سد روده السبرگ بین یک دوره از دسامبر ۲۰۰۸ و آوریل ۲۰۱۰ انجام شد در حالی که تنها یک آزمایش اندازه گیری در سپتامبر ۲۰۰۹ روی سد کوگا انجام شد. چندین روش تجزیه و تحلیل مودال عملیاتی (OMA) با استفاده از داده های ای آزمون ها از هر دو سد مقایسه شده است [۴۱ ، ۴۲]. فرکانسهای طبیعی سد روده السبرگ و سد کوگا به ترتیب در محدوده ۳-۷٫۷۰ هرتز و ۳٫۷۲-۸٫۳۰ هرتز بود. نتایج نشان داد که بهترین الگوریتم OMA مناسب برای پایش بر سد وجود ندارد. با این حال ، نویسندگان نتیجه گرفتند که آزمایش های لرزش محیط باعث افزایش ارزش نظارت ایمنی سدها می شود.

Ellis et al. [43] reported ambient vibration tests which were performed on Gem Lake dam in California, USA. The objective of the tests was to measure the dynamic response characteristics of the entire dam. Spectral analysis techniques that included the fast Fourier transform and the maximum entropy method, coupled with waterfall plot analyses, were effective in the identification of individual arch and full dam model behavior. Natural frequencies of the arches ranged from 13.18 to 27.71 Hz. Numerical modelling of the dam was carried out to gain an insight of how the dam behaves and was used to develop a suitable field test procedure. It was concluded that a practical field test approach based on ambient vibration testing can be adopted for large multiple arch dams.

الیس و همکاران [۴۳] آزمایشات ارتعاش محیطی سد Gem Lake در کالیفرنیا ، ایالات متحده را گزارش کرد. هدف از آزمایشات اندازه گیری ویژگی های پاسخ دینامیکی کل سازه سد بود. تکنیک های آنالیز طیفی ذکر شده در بالا، در شناسایی مشخصات خود سازه های قوسی و رفتار مدل سد کامل موثر بودند. فرکانسهای طبیعی سازه های قوسی در محدوده ۱۳٫۱۸ تا ۲۷٫۷۱ هرتز است. مدل سازی عددی سد برای به دست آوردن بینش از نحوه رفتار سد انجام شد و از آن برای تهیه یک روش آزمایش میدانی مناسب استفاده شد. نتیجه گیری شد که یک روش آزمایش میدانی و عملیاتی مبتنی بر آزمایش ارتعاش محیطی می تواند برای سدهای بزرگ چندگانه قوسی اتخاذ شود.

Sevim et al. [44] presented finite element model calibration of Berke arch dam in Turkey using operational modal analysis. Ambient vibration tests were conducted on the dam to obtain the vibration characteristics. Wind and water pressure were the source of excitation during ambient vibration testing of Berke dam. Using enhanced frequency domain decomposition modal parameters of the dam were obtained. Eight natural frequencies ranging between 2.74 and 9.66 Hz were determined. The analytical finite element model of Berke arch dam was calibrated to match with the measured dynamic characteristics of the dam.

Sevim و همکاران [۴۴] کالیبراسیون مدل المان محدود سد قوسی برک را در ترکیه با استفاده از آنالیز مودال عملیاتی ارائه داد. برای به دست آوردن خصوصیات دینامیکی، آزمایش ارتعاش محیطی روی سد انجام شد. باد و فشار آب منبع تولید ارتعاش در طول آزمایش های محیطی سد برکه بود. با استفاده از روش بالا پارامترهای دینامیکی سد به دست آمد. هشت فرکانس طبیعی بین ۲٫۷۴ و ۹٫۶۶ هرتز تعیین شد. مدل المان محدود تحلیلی سد قوسی برکه برای مطابقت با خصوصیات دینامیکی سازه واقعی سد ، کالیبره شد.

In summary, dynamic monitoring of dams using ambient vibration tests has been going for the last two decades. The major aim of all the tests was to determine the dynamic characteristics of dams and calibrating mathematical models. Other aims included: studying the effect of water reservoir levels to the resonant frequency, structural health monitoring and for seismic evaluation studies. In the extraction of dynamic properties from the ambient data from the dams, frequency domain procedure (peak picking) was widely used. This is because of its simplicity in the extraction of the dynamic properties. Other methods used include curve fitting of the transfer functions and random decrement method. However, with the development in signal analysis techniques, new methods such as frequency domain decomposition and stochastic subspace identification have also been used in the analysis of raw data from ambient vibration tests of dams. Table 2 below presents a summary of the methods of analysis, their principle, advantages and limitations followed by the name and type of dam for which these were applied.

به طور خلاصه ، پایش دینامیکی سدها با استفاده از تست ارتعاش محیطی طی دو دهه گذشته انجام شده است. هدف اصلی همه آزمایشات تعیین خصوصیات دینامیکی سدها و کالیبراسیون مدل‌های ریاضی بوده است. اهداف دیگر شامل: بررسی تأثیر سطح آب مخزن بر فرکانس های تشدید، پایش سلامت سازه و مطالعات ارزیابی لرزه ای است. جهت استخراج خصوصیات دینامیکی از داده های محیطی از سدها، از روش حوزه فرکانس (انتخاب اوج) استفاده گسترده ای شده است. که به دلیل سادگی این روش است. روشهای دیگر استفاده شده نیز در بالا ذکر شده است. با این حال ، با پیشرفت تکنیک های آنالیز سیگنال ، روش های جدیدی از جمله تجزیه حوزه فرکانس و شناسایی زیرفضای تصادفی نیز در تجزیه و تحلیل داده های خام از آزمایش ارتعاش محیطی سدها استفاده شده است. جدول ۲ خلاصه ای از روش های تجزیه و تحلیل ، اصول حاکم آنها ، مزایا و محدودیت ها همراه با نام و نوع سدی که برای آنها استفاده شده است آورده شده است.

Table 2 Methods of analysis, principles and name of the dam as applied in dynamic monitoring

Method of analysis	Principle	Advantages	Limitations	Name (type) of dam
Curve fitting of frequency transfer functions	Based on curve fitting of frequency transfer functions obtained by Fourier analysis. The computed transfer functions are used to estimate dynamic properties of a structure	Simple to use	Picking the peaks is always a subjective task; damping estimates are unreliable	Contra arch dam Fei-Tsui arch dam Gem Lake arch dam
Peak picking	The auto-spectra are normalized and averaged in order to obtain an averaged normalized power spectral density function that, in principle, shows all the resonance peaks corresponding to the vibration modes of a system	Simple to use	Picking the peaks is always a subjective task; Damping estimates are unreliable. Cannot handle noise efficiently	Ruskin gravity dam Claewern gravity dam Mauvoisin arch dam Hitotsuse arch dam Saveh arch dam
Frequency domain decomposition	Power spectral densities of a system are evaluated by performing singular value decomposition of the response spectral matrix. The spectral densities are decomposed in the contributions of the different modes of a system that, at each frequency, contribute to its response	Detects closely spaced modes	Cannot determine damping ratios	Cabril arch dam Berke arch dam
Stochastic subspace identification	Based on the stochastic subspace model theory. It identifies the state matrix and output matrix which contains dynamic properties of the structure using QRfactorization and singular value decomposition	Detects closely spaced modes No leakage	Stabilization diagram has many parameters	Cabril arch dam Roode Elsberg arch dam
Random decrement method	Time domain procedure, where the structural responses are transformed into random decrement functions, which are proportional to the correlation functions of the system operational responses	No leakage and less random	Requires experience	Fei-Tsui arch dam



#### 4 General summary

Monitoring the static and dynamic behavior of large dams is a topic of great relevance, due to the impact that these structures have on the landscape where they have been built. Health monitoring of dams plays an important role in securing their structural integrity and maintaining their longevity. This is divided into two namely: static and dynamic monitoring.

نظارت بر رفتار استاتیکی و دینامیکی سدهای بزرگ موضوعی است که از اهمیت بالایی برخوردار است که خود به دلیل تأثیری که این سازه ها در پیرامون مکانی که در آن ساخته شده است دارند. پایش سلامت سدها نقش مهمی در تأمین یکپارچگی سازه و حفظ طول عمر آنها دارد. این موضوع به دو دسته تقسیم می شود: نظارت استاتیکی و دینامیکی.

The paper has presented a literature review on the case studies on health monitoring of dams using static and dynamic properties. Static monitoring of dams involves measurement of static factors such as ambient temperatures, reservoir level, opening and closing of joints, crack opening, displacements and strains which are measured accurately by instruments. Mostly statistical models (HST model and multivariate statistical methods) have been used in the interpretation of field data although there were other methods implemented as structural identification techniques, short time Fourier transform and blind source separation. The main reason why statistical methods have been widely used is that they are simple in formulation and providing any correlation between governing and dependent parameters. In all the presented examples a lot of focus was put on the effect of reservoir water level, temperature on deformations and most of them have been a success. It can also be seen that for meaningful data interpretation in static monitoring, long time data records are needed. This can be seen that in the presented examples most data are beyond 10 years although there is one for 4 years given in the review. The review shows that static monitoring of dams has an excellent track record and is very useful in the assessment of dam's health.

در این مقاله یک بررسی مقالات در مورد مطالعات موردی در مورد نظارت بر سلامت سدها با استفاده از خواص استاتیکی و دینامیکی ارائه شده است. پایش استاتیکی بر روی سدها شامل اندازه گیری عوامل استاتیک مانند دمای محیط، سطح مخزن، باز و بسته شدن اتصالات، باز شدن ترک، جابجایی ها و کرنش ها است که به وسیله ابزار دقیق اندازه گیری می شوند. بیشتر مدل‌های آماری (مدل HST و روش‌های آماری چند متغیره) در تفسیر داده های میدانی مورد استفاده قرار گرفته اند اگرچه روش‌های دیگری نیز به عنوان روش‌های شناسایی سازه ای، تبدیل زمان کوتاه فوری و تفکیک منبع نیز اجرا شده است. دلیل اصلی استفاده گسترده از روش‌های آماری این است که آنها در فرمول بندی ساده هستند و ارتباطی مفهومی بین پارامترهای حاکم و وابسته دارند. در تمام نمونه های ارائه شده توجه زیادی به تأثیر سطح آب مخزن، اثر درجه حرارت بر تغییر شکل معطوف شده و بیشتر آنها موفقیت آمیز بوده اند. همچنین می توان دریافت که برای تفسیر معنی دار داده ها در پایش استاتیکی، به سوابق داده های طولانی نیاز است. مشاهده می شود که در نمونه های ارائه شده مطالعات روی بیشتر داده ها فراتر از 10 سال هستند اگرچه یک مورد برای 4 سال در بررسی وجود دارد. این بررسی نشان می دهد که نظارت استاتیکی بر روی سدها از سابقه بسیار خوبی برخوردار است و در ارزیابی سلامت سدها بسیار مفید است.

Dynamic monitoring of dams has been going on since 1980s with forced vibration testing being the first to be conducted on dams. Short term measurements of dynamic properties were done to mostly determine the relationship between reservoir water level and resonant frequencies, then validation and calibration of analytical models. From the year 1990, ambient vibration testing became a preferable methodology due to the advancement in technology for data acquisition systems and research in signal processing techniques.

نظارت پویا بر روی سدها از دهه 1980 میلادی ادامه دارد و آزمایش ارتعاش اجباری اولین موردی بود که روی سدها انجام شد. اندازه گیری های کوتاه مدت از خصوصیات دینامیکی بیشتر برای تعیین رابطه سطح آب مخزن با فرکانس های رزونانس، اعتبارسنجی و کالیبراسیون مدل های تحلیلی و ریاضی انجام شد. از سال 1990، آزمایش ارتعاش محیطی به دلیل پیشرفت در فن آوری سیستم های جمع آوری داده ها و گسترش تحقیقات در تکنیک های پردازش سیگنال، به یک روش برتر تبدیل شد.

In the earlier years, only once off measurements from AVT of dams were used for several purposes such as; (1) investigation of the feasibility and suitability of AVT of dams (2) investigating the safety and stability of dams (3) determine dynamic parameters for calibration and validation of finite element models of dams. However, from the year 2000, repeated measurements have been carried out on different dams for; (1) investigating the effect of reservoir levels on natural frequencies (2) development of a continuous dynamic monitoring system and (3) development of damage detection system based on long term AVT. This shows that AVT can now be used for long term safety monitoring of dams. For most of the presented case studies, frequency domain based (peak picking and frequency domain decomposition) have been used to extract the dynamic properties from vibration measurements. This is because these methods are simple and easy to use as compared to the time domain based methods.

در سال های اولیه، فقط اندازه گیری آفلاین AVT سدها برای اهداف مختلفی استفاده شد. از جمله (۱) بررسی امکان سنجی و مناسب بودن AVT سدها (۲) بررسی ایمنی و پایداری سدها (۳) تعیین پارامترهای دینامیکی برای کالیبراسیون و اعتبار دهی مدل های المان محدود سدها. با این حال، از سال ۲۰۰۰، اندازه گیری های مکرر در سدهای مختلف برای اهداف دیگر انجام شده است. (۱) بررسی تأثیر سطوح مخزن بر فرکانسهای طبیعی (۲) توسعه یک سیستم کنترل دینامیکی مداوم و (۳) توسعه سیستم تشخیص آسیب بر اساس AVT بلند مدت. این نشان می دهد که AVT اکنون می تواند برای پایش ایمنی طولانی مدت سدها مورد استفاده قرار گیرد. برای اکثر مطالعات موردی ارائه شده، روش حوزه فرکانس (انتخاب اوج و تجزیه دامنه فرکانس) برای استخراج خواص دینامیکی از داده های اندازه گیری ارتعاش استفاده شده است. دلیل این امر این است که این روشها نسبت به روشهای مبتنی بر حوزه زمان ساده و آسان هستند.

## 5 Critical issues for future research in health monitoring of concrete dams

This section contains a summary of the critical issues as perceived by the authors in the field of health monitoring of concrete dams. The importance of this section is to focus on the issues that need to be addressed by future research to make health monitoring of concrete dams more feasible.

این بخش حاوی خلاصه ای از موضوعات مهم است که توسط نویسندگان در زمینه نظارت بر سلامت سدهای بتنی درک می شود. اهمیت این بخش توجه به مواردی است که باید در تحقیقات آینده مورد توجه قرار گیرد تا پایش سلامت سدهای بتونی امکان پذیر شود.

The literature has little instances of studies where different data analysis methods in static monitoring are compared directly by application to a common data set. There are a few case studies [15, 19] where different methods of analysis in static monitoring have been presented, however the relative merits of these methods and their success in static monitoring of dams have not been directly compared in a sufficiently objective way.

مقالات به نمونه های کمی از مطالعات پرداخته اند که در آن روش های مختلف آنالیز داده ها در پایش استاتیکی با یکسری داده مشترک مقایسه شوند. چند مطالعه موردی وجود دارد [۱۵، ۱۹] که روش های مختلفی از تجزیه و تحلیل در پایش استاتیکی ارائه شده است، اما مزایای های نسبی این روش ها و موفقیت آنها در پایش استاتیکی سدها به طور مستقیم و به روش هدفمند و مناسب مقایسه نشده است.

Secondly, results from dynamic tests can be influenced by the following factors: fluid-structure interaction, foundation deformability and non-linear behavior of cracks which can change the dynamic properties (natural frequencies) of the structure. Therefore, research should not be limited to water level effects on natural frequencies but also to the above mentioned factors.

در مرحله دوم، نتایج حاصل از آزمایشات دینامیکی می تواند تحت تأثیر عوامل زیر باشد: اندرکنش جریان آب با سازه، تغییر شکل پذیری پی و رفتار غیر خطی ترکهای که می توانند خصوصیات دینامیکی (فرکانسهای طبیعی) سازه را تغییر دهند. بنابراین، تحقیقات نباید به تأثیرات سطح آب بر فرکانسهای طبیعی محدود شود بلکه به عوامل ذکر شده نیز بپردازد.

In addition, an issue that has received almost no attention in dynamic testing of dams is damage detection. That is to say the ability to distinguish between changes in the dynamic properties resulting from damage and those from environmental and operational loads. Several algorithms have been applied to other structures such as bridges and buildings but these cannot be applied to dams. This is because real-life vibration monitoring of dams are different from bridges and buildings. Therefore, there is a need for research on the damage detection algorithms in dam engineering.

علاوه بر این، موضوعی که تقریباً در آزمایشات دینامیکی سدها مورد توجه قرار نگرفته، موضوع تشخیص آسیب است. این به معنای وجود قابلیت تمایز بین تغییرات در خصوصیات دینامیکی ناشی از آسیب و تغییرات ناشی از عوامل محیطی و بارهای وارده و عملیاتی وجود دارد. چندین الگوریتم بر روی سازه های دیگر مانند پل ها و





ساختمان ها اعمال شده است اما این موارد برای سدها قابل استفاده نیست. این امر به این دلیل است که پایش چرخه واقعی ارتعاش سدها با پل ها و ساختمان ها متفاوت است. بنابراین ، نیاز به تحقیق در مورد الگوریتم های تشخیص خسارت در مهندسی سد وجود دارد.

Finite element analysis in dynamic monitoring using ambient vibration tests is another area that has not been fully explored. The case studies presented in this paper only compared analytical results to experimental results [9, 30, 32, 38, 44]. However, there is a need to integrate the information provided by finite element modelling with those continuously extracted from long term dynamic monitoring systems so as any structural anomalies can be detected.

آنالیز المان محدود در پایش دینامیکی سدها با استفاده از تست های ارتعاش محیطی، موضوع دیگری است که به طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است. مطالعات موردی ارائه شده در این مقاله تنها نتایج تحلیلی را با نتایج آزمایشاتی مقایسه می کند [۹ ، ۳۰ ، ۳۲ ، ۳۸ ، ۴۴]. در واقع نیاز به یکپارچه سازی اطلاعات ارائه شده توسط مدل سازی المان محدود با داده هایی که به طور مداوم از سیستم های پایش دینامیکی بلند مدت استخراج می شوند وجود دارد تا بتوان هرگونه ناهنجاری در سازه را تشخیص داد.

There is also a need to integrate the static response data with data from dynamic monitoring. Comparison of the evolution of dynamic properties especially natural frequencies and say deformations with time. This will be used to further provide an indication of the full performance of the dams.

همچنین نیاز به یکپارچه سازی داده های پاسخ استاتیکی با داده های پایش دینامیکی وجود دارد. همچنین ارزیابی و مقایسه مشخصات دینامیکی به ویژه فرکانسهای طبیعی با گذر زمان حائز اهمیت است. این مورد کمک فراوانی به ارائه شاخص ها از عملکرد سازه سدها می نماید.

Development of new analysis tools which can provide threshold values of structural responses (deformation and natural frequencies). This will help dam safety engineers to find solutions in case these threshold values are reached in the evaluation of the dam.

نیز توسعه ابزارهای جدید تحلیل که بتوانند امکان تعریف مقادیر آستانه برای پاسخهای سازه (تغییر شکل و فرکانسهای طبیعی) را فراهم آوردند. دستیابی به این مقادیر آستانه در پایش سلامت سدها، به مهندسان ایمنی سد کمک می کند تا بهترین راه حل ها را همواره فراهم آورند.

In conclusion, despite rigorous and considerable research in monitoring the structural integrity of infrastructure notably in bridges and buildings, health monitoring of dams is still lagging behind. While dam monitoring practice has been in existence for longer than other civil engineering disciplines such as bridges, this subject in dams has not kept pace with recent advances in sensing technologies and data analysis methodologies. If specific methodologies can be implemented to evaluate the structural health of concrete dams and extend the life of these structures, the investment in this research will be worthwhile.

در پایان ، علی رغم تحقیقات دقیق و قابل توجه در زمینه پایش سلامت زیرساختها به ویژه پل ها و ساختمانها ، پایش سلامت سدها هنوز عقب مانده است. در حالی که مدت بیشتری از عمر مطالعات پایش سدها نسبت به سایر رشته های مهندسی عمران مانند پل ها می گذرد، این موضوع در سدها با پیشرفت های اخیر در فن آوری های حسگرها و روش های تحلیل داده ها همگام نبوده است. اگر بتوان روشهای خاصی را برای ارزیابی و پایش سلامت سدهای بتنی به کار برد که باعث افزایش عمر این سازه ها شود، سرمایه گذاری در این تحقیقات ارزشمند خواهد بود.

Acknowledgments The authors would like to acknowledge the financial support of Water Research Commission (WRC) South Africa of the ongoing project. The authors also thank the Department of Water Affairs (DWA) South Africa for accepting the access of the dams for monitoring. Support provided by the Concrete Materials and Structural Research Unit (CoMSIRU) is highly recognized.

## References

1. Graham WJ (1999) A procedure for estimating loss of life caused by dam failure—DSO-99-06. Bureau of Reclamation, Denver 1999
2. Rich TP (2006) Lessons in social responsibility from the austindam failure. *Int J Engng Ed* 22(6):1287–1296
3. Brownjohn JW (2007) Structural health monitoring of civil infrastructure. *Phil Trans R Soc A* 365:589–622. doi:10.1098/rasta.2006.1925
4. ANCOLD (1994) Guidelines on risk assessment. Australian National Committee on Large dams, Sydney
5. Reynolds S (2013) Evaluating the decision criteria for the prioritization of South African dams for rehabilitation in terms of risk to human lives. Dissertation Stellenbosch University
6. ICOLD (1987). Dam safety: guidelines, Bulletin 59. Technical Report, International Committee on Large Dams
7. Bianchi M, Breiten R (2000) Health monitoring of arch dams recent developments. In: Proceedings of the International Workshop on the Present and Future in Health Monitoring. Bauhaus
8. Behrouz AN (2002) Multivariate statistical analysis of monitoring data for concrete dams. Dissertation. McGill University, Montreal



9. Danielle WE, Taylor CA (1999) Effective ambient vibration testing for validating numerical models of concrete dams. *Earthq Eng Struct Dynam* 28:1327–1344
10. Zhang LM, Brinker R, Andersen P (2005) An overview of operational modal analysis: major developments and issues. In: *Proceeding of 1st International Operational Modal Analysis Conference*, Copenhagen
11. Pytharouli S, Iand Stathis CS (2005) Deformation and reservoir level fluctuations: evidence for a causative relationship from spectral analysis of a geodetic monitoring record. *Eng Struct* 27:361–370
12. Chouinard L, Larivie`re R, Co`te` P, Zhao W (2006) Analysis of irreversible displacements in multiple arch concrete dam using principal component analysis. In: *The Proceedings of the International Conference on Computing and Decision making in Civil and Building Engineering*, Montreal
13. De Sortis A, Paoliani P (2007) Statistical analysis and structural identification in concrete dam monitoring. *Eng Struct* 29:110–120
14. Perner F, Oberhuber P (2010) Analysis of arch dam deformation. *Front Archit Civ Eng China* 4(1):102–108. doi:10.1007/s1170-010-0012-7
15. Mata J (2011) Interpretation of concrete dam behavior with artificial neural network and multiple linear regression models. *Eng Struct* 33:903–910
16. Loh CH, Chen CH, Hsu TY (2011) Application of advanced statistical methods for extracting long-term trends in static monitoring data from an arch dam. *J Struct Health Monit*. doi:10.1177/1475921710395807
17. Popescu TD (2011) A new approach for dam monitoring and surveillance using blind source separation. *Int J Innov Comput Inf Control* 7(6):3811–3824
18. Henriques MJ, Lima JN, Oliveira S (2012) Measuring inclinations in Cabril dam with an optoelectronic sensor. In: *Proceedings of the FIG working week 2012*, Rome
19. Demirkaya S, Balcilar B (2012) The contribution of soft computing techniques for the interpretation of dam deformation. In: *Proceedings of the FIG working week 2012*, Rome
20. Mata J, Tavares de Castro A, Sa` da Costa J (2013) Time–frequency analysis for concrete dam control: correlation between the daily variation of structural response and air temperature. *J Eng Struct* 48:658–665
21. Wieland M, Kirchen GF (2012) Long-term dam safety monitoring of Punt dam Gall arch dam in Switzerland. *J Struct Civil Eng* 6:76–83
22. Severn RT, Jeary AP, Ellis BR (1980) Forced vibration tests and theoretical studies on dams. In: *Proceedings of Institution of Civil Engineers*, Part 2, vol 69 ICE London
23. Clough RW, Chang KW, Stephen RW (1986) *Vibration behavior of Xiang Hong Dian dam*. UC, Berkeley
24. Cantieni R, Wiberg U, Pietrzko S (2004) Modal investigation of adam. In: *Proceedings of the 16th International Modal Analysis Conference*, Santa Barbara, 1998: 1151–1157
25. Deinum PJ, Dungar R, Ellis BR, Jeary AP, Reed GAL (1982) Vibration tests on Emmoson arch dam, Switzerland. *Earthq Eng Struct Dynam* 10(3):996
26. Duron ZH, Hall JF (1988) Experimental and finite element studies of the forced vibration response of Morrow Point dam. *Earthq Eng Struct Dynam* 16(7):1021–1039
27. Van Overschee P, De Moor B (1996) *Subspace identification for linear systems: theory–implementation and applications*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
28. Brincker R, Andersen P, Jacobsen NJ (2007) Automated frequency domain decomposition for operational modal analysis. In:

## 123

View publication stats

Proceedings of the 25th International Modal Analysis Conference, Orlando

29. Brownjohn JMW, Severn RT, Taylor CA (1986) Ambient vibration survey of Contra dam. Research Report University of Bristol Department of Civil Engineering, UK
30. Brownjohn JMW (1990) Dynamic investigation of Hermitage Dam, Jamaica. Report UBCE-EE-90-13 University of Bristol Department of Civil Engineering, UK
31. Loh CH, Tsu-Shiu W (1996) Identification of Fei-Tsui arch dam from both ambient and seismic response data. *Soil Dyn Earthq Eng* 15:465–483
32. Kemp BG (1996) Ambient vibration assessment of Ruskin dam: dynamic properties. University of British Columbia (UBC), Vancouver
33. Darbre GR, De Smet CAM, Kraemer C (2000) Natural frequencies measured from ambient vibration response of the arch dam of Mauvoisin. *Earthq Eng Struct Dyn* 29:558–577
34. Mivehchi MR, Ahmadi MT (2003) Effective techniques for arch dam ambient vibration test. Application on two Iranian dams. Report from the International Institute of Earthquake and Seismology (IIEES), Tehran
35. Oliveira S, Rodrigues J, Mendes P, Costa AC (2004) Damage characterization in concrete dams using output-only modal analysis. In: *The Proceedings of 22nd International Modal Analysis Conference Dearborn, Michigan*
36. Mendes P, Oliveira S, Guerreiro S, Baptista MA, Campos Costa A (2004) Dynamic behavior of concrete dams monitoring and modelling. In: *The Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver



37. Mendes P, Oliveira Costa C, Almeida Garrett J, Oliveira S (2007) Development of monitoring system to Cabril dam with operational modal analysis. In: The Proceedings of the 2nd Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES), Porto
38. Mendes P, Oliveira S (2009) Influence of the intake tower behavior on modal identification of Cabril dam. In: The proceedings of the 3rd International Operational Modal Analysis Conference Portonovo
39. Okuma N, Etou Y, Kanzawa K, Hirata K (2008) Evaluation of dynamic properties of an aged large arch dam. Civil Engineering Group. Research Laboratory report, Kyushu Electric Power Co., Fukuoka
40. Moyo P, Oosthuizen C (2010) Ambient vibration survey trials of two arch dams in South Africa. In: The Proceedings of the 8th ICOLD European Club Symposium, Innsbruck
41. Bukenya P, Moyo P, Oosthuizen C (2012a) Modal parameter estimation from ambient vibration measurements of a dam using stochastic subspace identification methods. In: The Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting Cape Town, South Africa
42. Bukenya P, Moyo P, Beushausen H, Oosthuizen C (2012b) Comparative study of operational modal analysis techniques using ambient vibration measurements of a concrete dam. In: The Proceedings of the 25th International conference on Noise and Vibration Engineering, Leuven
43. Ellis E, Duron Z, Von Gersdorff N, Knarr, N (2010) Dynamic characterization of a large multiple arch dam. In: The Proceedings of the 30th Annual USSD conference, Sacramento
44. Sevim B, Bayraktar A, Altunisk AC (2010) Finite element model calibration of Berke arch dam using operational modal testing. *J Vibra Contr.* doi:[10.1177/1077546310377912](https://doi.org/10.1177/1077546310377912)

