# Chapter 136 Dams

# **Reto Cantieni**

rci dynamics, Duebendorf, Switzerland

1 Introduction	1
2 Vieux Emosson Dam	7
3 Norsjo Dam"	13
4 Mauvoisin Dam	21
References	35

# **1 INTRODUCTION**

#### 1.1 Health monitoring of dams

Standard procedures to monitor dams include visual inspection, monitoring of the static deformation behavior using geodetic instruments, plumb lines and clinometers, checking for pore and uplift pressures using piezometers, measuring drainage water as well as measuring temperature and water level. In addition, some dams are equipped with vibration sensors and a local data acquisition facility that can be accessed remotely. In Switzerland, five dams are part of the Swiss National Strong Motion Network [1]. Signals are acquired upon the trigger level of, depending on the local conditions, 0.001,...,0.005g, being crossed. From the installation of the system in 1992 until the end of 2004, 502 acceleration time signals from 161 events have been recorded [2].

روشهای استاندارد برای نظارت بر سدها شامل بازرسی بصری ، پایش رفتار تغییر شکل استاتیک با استفاده از ابزارهای ژئودزی ، نظارت بر خطوط لوله کشی با شیب سنج ها ، بررسی فشار منافذ و فشار آپلیفت با استفاده از پیزومترها ، اندازه گیری آب زهکشی و همچنین اندازه گیری دما و سطح آب است. علاوه بر این، برخی از سدها مجهز به سنسورهای لرزش و یک مرکز جمع آوری محلی داده هستند که از راه دور می توان به آنها دسترسی داشت. در سوئیس، پنج سد بخشی از شبکه ملی سوئیس [۱] است. بسته به شرایط محلی ، سیگنال های فراتر از حدود ۱۰٫۰۰۰ تا ۶۰٬۰۰ g جمع آوری می شوند. از زمان نصب سیستم در سال ۱۹۹۲ تا پایان سال ۲۰۰۴ ، ۵۰۲ سیگنال شتاب – زمان از تعداد ۱۶۱ رخداد ذخیره گردیده است.

This yielded insight into the dynamic behavior of the dams in a limited number of points under earthquake excitation. However, to the knowledge of this author, no real attempt to monitor a dam's structural health based on its dynamic characteristics has been realized up to now. There are several reasons for this.

Firstly, the dynamic characteristics of a civil engineering structure are determined through its mass and stiffness. Before being able to relate changes in these characteristics to changes in structural health, any other source of changes in the dynamic characteristics has to be identified and its influence eliminated. For bridges, these "other sources" predominantly include temperature, because this may influence the stiffness of (asphalt) pavement and (flat) foundations. For dams, the situation is worse. Here, the main "other source" is the level of water in the reservoir. This simultaneously influences the mass and stiffness of the dam structure. This is discussed in a later section. Second, determination of a dam's dynamic characteristics is not easy. Large dams tend to be located in remote areas where accessibility might be a problem. Performing a dynamic test on such a structure usually becomes an expensive challenge.

دلیل اول اینکه، ویژگی های دینامیکی یک سازه مهندسی عمران از طریق جرم و سختی آن تعیین می شود. قبل از اینکه بتوان تغییرات این خصوصیات را با تغییرات در سلامت سازه مرتبط ساخت ، باید هر "منبع دیگری" از تغییرات در خصوصیات دینامیکی مشخص شود و تأثیر آن از بین برود. برای پل ها ، این "منابع دیگر" به طور عمده شامل درجه حرارت هستند ، زیرا این ممکن است روی سختی روکش آسفالت و مشخصات فونداسیون های مسطح تأثیر بگذارد. برای سدها وضعیت بدتر است. در اینجا "منبع اصلی" دیگر سطح آب موجود در مخزن است. این به طور همزمان بر جرم و سختی سازه سد تأثیر می گذارد. این موضوع در بخش بعدی بحث شده است. دوم، تعیین خصوصیات دینامیکی سد کار آسانی نیست. سدهای بزرگ بیشتر در مناطقی دور دارند که دسترسی به آن ممکن است مشکلاتی ایجاد کند. انجام آزمایشات دینامیکی بر چنین سازه هایی معمولاً به یک چالش گران تبدیل می شود.

Although no real health monitoring system making use of changes in dynamic characteristics has been installed in a dam up to now, several steps in this direction have been undertaken in the last 20–30 years.

**Step 1.** Achieving a set of experimental data reflecting the real behavior of the structure and hence becoming able to update an existing finite element (FE) model of the structure. Within the limits of linearity, further analyses can then be performed on a model known to be as close to reality as possible. This article presents two examples of this kind. Attempts to extend the boundaries of the problem to the surrounding rock and to the reservoir and to study dam–reservoir–soil interaction effects are discussed in [3–6]. Then, the challenge from the view of experimental side is the simultaneous measurement of dam vibrations and hydrodynamic pressure oscillations.

مرحله ۱. دستیابی به مجموعه ای از داده های آزمایشاتی است که رفتار واقعی سازه را نشان دهند و از این طریق قادر به به روزرسانی مدل المان محدود موجود (FE) سازه باشد. در محدوده خطی رفتار سازه، تجزیه و تحلیل های بیشتر بر روی مدل می تواند تا حد امکان آن را به واقعیت سازه نزدیک کنند. در این مقاله دو نمونه از این نوع ارائه شده است. در عین حال تلاش برای حل مشکلات بیشتر مانند رفتار سنگ بستر اطراف سازه و مخزن و مطالعه اندرکنش های سد – مخزن – خاک در [۶–۳] بحث شده است. سپس چالش بعدی از نقطه نظر آزمایشاتی، اندازه گیری همزمان ارتعاشات سد و نوسانات فشار هیدرودینامیکی آب مخزن است.

**Step 2.** Determining the influence of changes in the reservoir water level on the dynamic characteristics of a dam [5, 6]. This article presents one example of this kind.

## 1.2 Dynamic (dam) testing methods

Today, two basically different test procedures are available: forced vibration testing (FVT) and ambient vibration testing (AVT). FVT is also called experimental modal analysis or traditional modal analysis in the literature. For AVT, there are even more expressions used: "output-only modal analysis", "natural input modal analysis", and "operational modal analysis". For the sake of simplicity, we will stay with the expressions FVT and AVT here. longer of the sake of simplicity, we will stay with the expressions FVT and AVT here. longer of the sake of simplicity, or the sake of simplicity, adello trade the expressions FVT and AVT here. longer of the sake of

ورودی طبیعی" و "آنالیز مودال عملیاتی". به خاطر سادگی ، ما در اینجا با عبارات FVT و AVT خواهیم ماند.

With FVT, the structure is excited dynamically using a vibration generator (shaker) and the resulting structural vibrations are measured. The dynamic excitation force is either measured with a load cell or calculated through determination of the inertial forces involved. The structure's vibrations are measured using accelerometers. The number of measurement points usually being much larger than the number of sensors disposable, the measurement is divided into several setups. One setup being finished, the sensors are moved to new positions and the next setup is measured. The force signal acts as a reference, which all response signals are related to. It is then possible to put together, e.g., the mode shapes determined to cover all the measured points. Data processing, i.e., determination of the structure's dynamic characteristics is based on the assumption that the artificial force produced by the vibration generator is the only source of the dam vibrations measured. We see that this assumption is not valid in cases where, e.g., machinery is operating close to the dam. We also see that this is not always a serious problem. With dams, problems might arise when the excitation through wind and/or waves is of the same order of magnitude as the shaker-induced vibrations.

در روش FVT ، سازه با استفاده از مولد لرزش (شاکر) به صورت دینامیکی مرتعش می شود و ارتعاشات سازه ای حاصل از آن اندازه گیری می شود. نیروی محرک نیز با یک نیروسنج یا از طریق تعیین نیروهای اینرسی مربوطه ایجاد شده محاسبه می شود. ارتعاشات سازه با استفاده از شتاب سنج اندازه گیری می شود. تعداد نقاط اندازه گیری روی سازه معمولاً بسیار بیشتر از تعداد سنسورهای در اختیار است ، که در نتیجه اندازه گیری نهایتا به چندین ستاپ تست تقسیم می شود. یک ستاپ تست که به پایان رسید ، سنسورها به موقعیت های جدید منتقل می شوند و ستاپ تست بعدی اندازه گیری می شود. سیگنال نیروی ورودی به عنوان یک مرجع عمل می کند ، که تمام سیگنال های پاسخ به آن مربوط می شوند. سپس می توان به عنوان مثال اشکال مودی بدست آمده را یکی کرد و به تمامی نقاط اندازه گیری شده گسترش داد. پردازش داده ها ، یعنی تعیین ویژگی های دینامیکی سازه بر اساس این فرض است که نیروی مصنوعی تولید شده توسط مولد لرزش تنها منبع لرزش های اندازه گیری شده سد است. ما می بینیم که این فرض در مواردی معتبر نیست که مثلاً در مواقعی که ماشین آلات سنگین نزدیک سد کار می کنند. ما همچنین می بینیم که این میشیم یک مشکل جدی نیست. در مورد سدها ، ممکن است مشکل ناشی از تحریک باد یا امواج آب که همان بزرگی ارتعاشات ناشی از شاکر باشد، حاصل شود.

With AVT, the structural vibrations excited by unknown ambient sources are measured. In the case of dams, these ambient forces can be wind, waves, and/or microtremors. Instead of using the force input signal as a reference signal, the response signal measured in (one or more) so-called reference points is used for this purpose. The reference points have to be measured in all setups. Data processing, i.e., determination of the structure's dynamic characteristics, is based on the assumption that the frequency content of the exciting forces is flat, i.e., more or less of the white noise type.

در روش AVT ، ارتعاشات سازه ای حاصل از منابع ناشناخته محیطی اندازه گیری می شود. در مورد سدها ، این نیروهای محیطی می توانند از باد ، امواج یا ریزلرزش ها باشند. به جای استفاده از سیگنال ورودی نیرو به عنوان سیگنال مرجع ، از سیگنال پاسخ اندازه گیری شده در (یک یا چند) نقاط به اصطلاح مرجع برای این منظور استفاده می شود. نقاط مرجع باید در کلیه تنظیمات اندازه گیری ثابت باشد. پردازش داده ها ، یعنی تعیین ویژگی های دینامیکی سازه ، بر اساس این فرض است که محتوای فرکانسی نیروهای محرک محیطی ثابت است ، یعنی کم و بیش از نوع نویز سفید. Besides being much cheaper than FVT, AVT has the advantage of being a multiple input multiple output (MIMO) procedure. This means that the ambient forces exciting the structure are simultaneously acting on many points of the structure. Especially for civil engineering structures, FVT is usually a single input multiple output (SIMO) procedure. It can be seen from the examples, discussed later, that using more than one shaker on a structure is not the standard procedure. Choosing the proper position of the driving point, where the vibration generator is located is hence always one of the crucial problems to be solved. The shaker should not sit in a node of the shape of one of the modes of concern. The same problem arises with AVT tests when only one reference point is used. This can, however, be solved easily through using more than one reference point. Performing a preliminary FE analysis is also a good means to prevent problems with the placement of shaker and reference points.

علاوه بر اینکه بسیار ارزانتر از FVT است ، AVT این مزیت را نیز دارد که روشی است بر پایه چند ورودی و چند خروجی (MIMO). این بدان معنی است که نیروهای ارتعاش محیطی که سازه را تحریک می کنند ، همزمان در بسیاری از نقاط سازه وارد می شوند. به خصوص برای سازه های مهندسی عمران ، روش FVT معمولاً بر پایه یک ورودی چند خروجی (SIMO) است. از مثالهایی که بعداً مورد بحث قرار گرفت ، می توان دریافت که استفاده بیش از یک شاکر روی سازه روشی استاندارد نیست. از این رو انتخاب موقعیت مناسب نقطه جانمایی شیکر، جایی که مولد ارتعاش در آن قرار دارد ، همیشه یکی از مشکلات اساسی است که باید حل شود. شاکر نباید در گره های اشکال مودی مورد انتظار بنشیند. مشکل مشابه نیز زمانی روی می دهد که فقط از یک نقطه مرجع در تست های AVT استفاده می شود. با این وجود ، این امر به راحتی با استفاده انتخاب بیش از یک نقطه مرجع قابل حل است. انجام یک تحلیل مقدماتی FE نیز وسیله خوبی برای جلوگیری از بروز مشکلات اینچنینی در انتخاب نامناسب محل قرار گیری

#### **1.3** Short history of dynamic testing of structures

Historically, efficient FVT procedures have been developed much earlier than AVT procedures. The first important step was development of the fast Fourier transform (FFT) algorithm, which allowed easy calculation of a frequency spectrum from a measured time signal in 1965 [8]. Subsequently, further signal processing routines were developed by mechanical engineers dealing with "small" structures easily fitting into a laboratory. In such cases, artificial excitation, e.g., using a hammer or a small electrodynamic shaker was not a problem. The first International Modal Analysis Conference (IMAC) 1, held in 1982, and its successors reflected the respective development. In the late 1970s, when civil engineers started to make use of the methods developed in the "mechanical world" they tried to apply the well–developed FVT methods as far as possible.

از لحاظ تاریخی ، روشهای کارآمد FVT بسیار زودتر از روشها AVT توسعه یافته اند. اولین گام مهم، توسعه الگوریتم تبدیل فوریه سریع (FFT) بود که امکان محاسبه آسان طیف فرکانس از یک سیگنال زمانی اندازه گیری شده در سال ۱۹۶۵ را فراهم می آورد [۸]. پس از آن ، روشهای پردازش سیگنال توسط مهندسین مکانیک که با سازه های "کوچک" به راحتی در یک آزمایشگاه سروکار دارند ، توسعه داده شد. در چنین مواردی ایجاد تحریک مصنوعی ، به عنوان مثال ، استفاده از چکش یا یک شاکر الکترودینامیکی کوچک مشکلی نبود. اولین کنفرانس بین المللی تحلیل مودال 1 (IMAC) ، در سال ۱۹۸۲ برگزار شد که منعکس کننده پیشرفت های مربوطه در این زمینه بود. در اواخر دهه ۱۹۷۰ ،مهندسان عمران شروع به استفاده از روشهای توسعه یافته در "دنیای مکانیکی" کردند، آنها سعی کردند تا حد امکان از روشهای پیشرفته FVT However, there are civil structures like, e.g., suspension bridges or dams, which are not easy to excite artificially to a sufficient degree. This is why AVT soon became a topic for civil engineering structures. Of course, "manual signal processing" using a two-channel frequency analyzer and determining the amplitude and phase relationships between two time signals has been possible since about 1975. However, in the mid 1990s, the time had come for civil engineers to develop the procedures necessary for the efficient processing of an AVT test with a large number of degrees of freedom involved [9]. Today, even more efficient methods operating in the frequency and/or the time domains are available to process the signals of an ambient test [10–12].

با این حال ، سازه های عمرانی مانند پل های تعلیق یا سدها وجود دارد که تحریک مصنوعی آنها تا حد کافی آسان نیست. به همین دلیل روشهای AVT خیلی زود به موضوعی برای سازه های مهندسی عمران تبدیل شد. البته "پردازش سیگنال دستی" با استفاده از آنالیزگر فرکانس دو کانالی و تعیین روابط دامنه و فاز بین دو سیگنال زمانی از سال ۱۹۷۵ امکان پذیر شد. با این وجود ، در اواسط دهه ۱۹۹۰ ، زمان توسعه روش های مهندسان عمران فرا رسیده بود و روش های لازم برای پردازش کارآمد یک تست AVT با تعداد زیادی از درجه آزادی از سازه فراهم آمد [۹]. امروزه حتی روش های کارآمدتری در حوزه فرکانس یا زمان، برای پردازش سیگنال های یک آزمایش محیطی در دسترس هستند[۱۰–۱۲].

# 1.4 Short history of dynamic dam testing

Probably, first attempts to experimentally determine a dam's dynamic characteristics were undertaken in the late 1970s. In a book edited by Graham Tilly [13], Calciati is cited having tested 10 dams in Italy [14], and a British team of the University of Bristol and the British Research Establishment (BRE), is cited to have tested 6 dams in the United Kingdom and in Switzerland [15, 16]. Flesch of Austrian Arsenal is cited to have performed tests on a dam with the reservoir being full and empty [17, 18]. Fanelli and his colleagues report on extensive tests performed during three years on Talvacchia Dam in Italy [5, 6]. All these tests were performed between 1978 and 1988. [11]

As a consequence of the historical development described earlier, the FVT method using vibration generators was applied in all the above-mentioned cases. Since hammer is not really a well-suited instrument to excite a dam, vibration generators of the unbalanced mass type were built. These are relatively easy to install and they can be operated with a comparatively small amount of energy. The inertial force produced is concentrated into one simply harmonic vibration.

طبق پیشرفت های تاریخی در زمینه نوع آزمون ها که در ابتدا توضیح داده شد، روش FVT با استفاده از مولد ها لرزش، در کلیه موارد فوق به کار گرفته شد. از آنجا که چکش ارتعاشی واقعاً ابزاری مناسب برای ایجاد لرزه در سد نیست ، مولدهای ارتعاش از نوع جرم های نامتعادل ساخته شده اند. نصب اینها نسبتاً آسان است و با مقدار نسبتاً کمی انرژی قابل کار است. نیروی اینرسی تولیدی می تواند در یک ارتعاش ساده هارمونیک متمرکز شود. However, performing a test covering the typical frequency band f = 2, ..., 20Hz was a very time-consuming procedure. Assuming a frequency resolution of  $\Delta f = 0$ . 1Hz, the test consisted of 180 individual tests using a different frequency of excitation (and keeping the response measurement points always in the same place). To keep the amplitude of the dynamic force generated in certain limits, the position of the unbalanced masses had to be adapted from time to time. Usually, this force could not be measured directly. Therefore, modern modal analysis methods could not be applied. It was, however, possible to determine natural frequencies, mode shapes, and damping of earth dams, gravity dams, and arch dams like the Emosson dam in Switzerland with a height of 180m. With the latter, some problems arose with the wind influencing the dam vibrations [16]. For strong wind conditions, the vibrations excited through wind were of the same order of magnitude as those excited with the shaker.

با این حال ، انجام یک آزمون که تمامی باند فرکانس معمولی از f = 2 ، ...، Hz ۲۰ را پوشش دهد ، یک روش بسیار وقت گیر بود. با فرض دقت فرکانس ۰٫۱ هرتز برای آزمون ها ، آزمایش کلی شامل ۱۸۰ آزمون مجزا با استفاده از فرکانس های متفاوت لرزش می باشد. (نقاط اندازه گیری پاسخ همیشه یک مکان ثابت بودند). برای حفظ دامنه نیروی دینامیکی تولید شده در یک محدوده خاص، موقعیت جرم های نامتوازن هر از گاهی باید اصلاح می شد. معمولاً این نیرو به طور مستقیم قابل اندازه گیری نیست. بنابراین ، روشهای مدرن آنالیز مودال قابل استفاده نیست. با این وجود می توان فرکانس های طبیعی ، اشکال مودی و ضرایب میرایی سدهای خاکی ، سدهای وزنی و سدهای قوسی مانند سد اموسون در سوئیس را با ارتفاع ۱۸۰ متر تعیین کرد. با این حالت ، برخی از مشکلات در خصوص تاثیر باد بر لرزش سد ایجاد شده است [۱۶]. برای شرایط باد شدید ، لرزشهایی که از طریق باد ایجاد می شوند ، به همان بزرگی هستند که با شاکر ایجاد می شوند.

As a next step, servohydraulic vibration generators were built e.g., in Switzerland by the Swiss Federal Laboratories for Material Testing and Research, EMPA. (A similar device was also built by Arsenal in Austria.) Besides a simply harmonic vibration's these could produce a broadband random-type force signal covering the whole frequency band of concern. The energy available was distributed over a larger frequency band, but the tests were much less time consuming. This allowed increasing the number of measurement points significantly. Instead of using the time slot available for testing with sweeping through the frequency band of interest, it was used for roving the sensors available over the structure in several test setups. As a result, the measurement point grid density and hence the resolution of the mode shapes could be increased significantly. As is shown with the three tests described here, respective limits are dictated by the accessibility of points to be measured only. Tests performed by EMPA on two dams using servohydraulic shakers are described, in more detail, later.

در مرحله بعدی ، مولدهای ارتعاش سرووهیدرولیک در سوئیس توسط آزمایشگاه های فدرال سوئیس برای آزمایش مواد و تحقیقات، EMPAساخته شدند. (یک دستگاه مشابه توسط آرسنال در اتریش نیز ساخته شده است.) علاوه بر امکان ایجاد یک ارتعاش ساده هارمونیک ، این دستگاه می تواند یک سیگنال نیرو از نوع تصادفی پهن باند را نیز پوشش دهد که کل باند فرکانس مورد انتظار را ایجاد کند. انرژی موجود در یک پهنای باند بزرگتر توزیع می شد ، اما آزمایش ها بسیار کمتر زمان بر بود. این امر باعث افزایش قابل توجه تعداد نقاط اندازه گیری شد. از بازه های زمانی که برای آزمایش در فرکانس های موجود در باند مورد انتظار وجود داشت، برای جابجایی سنسورهای موجود بر روی سازه در چندین مجموعه تست استفاده شد. در نتیجه ، چگالی شبکه نقاط اندازه گیری و نیز دقت اشکال وجود داشت، برای جابجایی سنسورهای موجود بر روی سازه در چندین مجموعه تست استفاده شد. در نتیجه ، چگالی شبکه نقاط اندازه گیری و نیز دقت اشکال مودی می تواند به میزان قابل توجهی افزایش یابد. همانطور که در سه آزمایش شرح داده شده در اینجا مقاله نشان داده شده است ، محدودیت های به وجود آمده مودی می تواند به میزان قابل توجهی افزایش یابد. همانطور که در سه آزمایش شرح داده شده در اینجا مقاله نشان داده شده از شیکرهای سروهای مودودیت های اندازه گیری می شود. آزمایشات انجام شده توسط EMPA و در و سد با استفاده از شیکرهای سرووهیدرولیک ،

# 2 VIEUX EMOSSON DAM

# 2.1 The dam

Vieux Emosson dam is a curved concrete gravity structure located close to the border between Switzerland and France in the Mont Blanc region at a height of 2200m above sea level. With a length at the crest of 175m, a maximum height of 42m, and a concrete volume of 62500m<sup>3</sup>, it is of moderate size (Figures 1 and 2). The dam consists of 13 monolithic blocks of roughly 13.5m length each. The block width varies between 4 and 7m at the dam crest and reaches 20m at the foundation (Figure 3).

سد Vieux Emosson یک سازه وزنی بتنی قوسی است که نزدیک به مرز بین سوئیس و فرانسه در منطقه مونت بلان در ارتفاع ۲۲۰۰ متر از سطح دریا واقع شده است و دارای طول تاج ۱۷۵ متر، حداکثر ارتفاع ۴۲ متر و حجم بتنی ۶۲۵۰۰ متر مکعب است. (شکل ۱ و ۲) .این سد از ۱۳ بلوک یکپارچه با طول تقریباً ۱۳٫۵ متر تشکیل شده است. عرض هر بلوک بین ۴ تا ۷ متر در تاج سد متغیر است و در فونداسیون به ۲۰ متر می رسد



Figure 1. Vieux Emosson dam as seen from the air side.



Figure 2. Vieux Emosson dam as seen from the water side.



Figure 3. Vieux Emosson dam cross section.

No machinery is located close to the dam. Vieux Emosson dam is simply collecting water throughout the summer and the reservoir is emptied in autumn through letting the water flow freely in the reservoir of Emosson dam, which is located downstream of Vieux Emosson dam. This means that no disturbing dam vibrations generated by machinery occur.

هیچ دستگاهی در نزدیکی سد قرار ندارد. سد Vieux Emosson به سادگی آب را در طول تابستان جمع آوری میکند و مخزن آن در پاییز از طریق خروج آزادانه به سمت مخزن سد Emosson که در پایین دست سد Vieux Emosson قرار دارد ، خالی می شود. این بدان معنی است که هیچ گونه ارتعاش مزاحم توسط ماشین آلات ایجاد نمی شود.

As the dam site is accessible with cars but not with trucks, all the equipment discussed here had to be flown to the dam crest using helicopters of the Swiss Army (Figure 4).

از آنجا که محل سد با اتومبیل ها قابل دسترسی است اما نه با کامیون ها ، تمام تجهیزات مورد بحث در اینجا باید با استفاده از بالگردهای ارتش سوئیس به تاج سد منتقل شوند (شکل ۴).

The dam is owned by the Swiss Federal Railways, SBB. The tests were financed as an EMPA research project [19–21].

این سد متعلق به راه آهن فدرال سوئیس ، SBBاست. این آزمایشات به عنوان یک پروژه تحقیقاتی EMPA تأمین مالی شد [۱۹–۱۹.



Figure 4. Helicopter taking over equipment at the base station.



Figure 5. Servohydraulic vibration generator fixed to the crest of Vieux Emosson dam. 2.2 The excitation

The main part of the vibration generator is a 32-kN cylinder with a 1000kg mass fixed to the piston rod (Figure 5). A load cell is located between the cylinder and its supporting device. The 250-mmstroke cylinder is equipped with a 63lmin<sup>-1</sup> servovalve and controlled through an electronic circuitry. The hydraulic power pack driving the cylinder produced 40lmin<sup>-1</sup> of 280 bar oil (Figure 6). In order not to disturb the measurements, the power pack was supported by air springs. A 60-kW diesel generator drove the hydraulic power pack (Figure 7).

قسمت اصلی مولد ارتعاش یک سیلندر هیدرولیکی ۳۲ کیلو نیوتن و جرم ۱۰۰۰ کیلوگرم متصل به یک میله پیستون است (شکل ۵). یک نیروسنج بین سیلندر و دستگاه پشتیبانی آن قرار دارد. سیلندر با استروک ۲۵۰ میلی متر مجهز به سرووالو ۶۳ دور در دقیقه است و از طریق یک مدار الکترونیکی کنترل می شود. یک مجموعه پاور هیدرولیکی که سیلندر را هدایت می کند ، ۲۸۰ بار فشار را تولید می کند (شکل ۶). به منظور جلوگیری از ایجاد تداخل در اندازه گیری های شتاب ، مجموعه پارو به هوا – فنرها متصل می شد. یک دیزل ژنراتور ۶۰ کیلو واتی انرژی مورد نیاز تجهیزات هیدرولیک را فراهم می کند (شکل ۲.

Points 10 and 17 were chosen as driving points (where the vibration generator was located). The influence of the shaker location on the results is discussed in [20]. Here, results for only the shaker position 10 are presented. نقاط ۱۰ و ۱۷ به عنوان نقاط محرک(جایی که ژنراتور لرزش در آن قرار داشت) انتخاب شدند. تأثیر مکان شاکر در نتایج در [۲۰] بحث شده است. در اینجا ، نتایج فقط برای شاکر موقعیت ۱۰ ارائه شده است. The driving signal of band-limited burst random type was provided by the modal analysis software package. To achieve a force spectrum being flat in the region of interest, f = 5,...,40Hz, the signal driving the cylinder in the displacement-controlled mode had to be fine-tuned on site. The peak force amplitude was chosen to 28kN.



Figure 6. Hydraulic power pack (to the left) and air cooler (to the right).



Figure 7. Sixty kilowatt diesel power generator.

# 2.3 The response

Three accelerometers Bruel&Kjær 8306 mounted<sup>••</sup> orthogonally to each other on a supporting steel plate were used to measure the structural response (see **Microelectromechanical Systems (MEMS)**). The sensitivity of this type of instruments is  $10Vg^{-1}$  and the resolution is  $10^{-6}$  ms<sup>-2</sup>. As Vieux Emosson dam has an inspection gallery close to the foundation only, the measurement points were located on the dam crest and above the water line (Figures 8 and 9). One of the questions that should have been answered through the tests was, is there any relative movement between two adjacent blocks? As a consequence, measurement points were located on both sides of the joints. The measurement point grid consisted of a total of 53 points (Figure 10).

برای اندازه گیری پاسخ سازه از سه شتاب سنج <sup>۳</sup> Bruel & Kjær 8306 به طور عمود بر هم و نصب شده بر روی یک صفحه فولادی استفاده شد. حساسیت این نوع سازها ۱۰ Vg-1 و وضوح آن <sup>2-6</sup> ms است. از آنجا که سد Vieux Emosson فقط یک گالری بازرسی نزدیک به فونداسیون دارد ، نقاط اندازه گیری در تاج سد و بالاتر از خط آب واقع شده اند (شکل ۸ و ۹). یکی از سؤالی که باید از طریق تست ها به آن پاسخ داده میشد این بود که آیا بین دو بلوک مجاور بدنه سد حرکت نسبی وجود دارد؟ در نتیجه ، نقاط اندازه گیری در دو طرف نقاط اتصال قرار داده شدند. شبکه نقاط اندازه گیری در کل از ۵۳ نقطه تشکیل شده است .شکل ۱۰

# 2.4 Signal acquisition and processing



Figure 8. 3-D accelerometer response measurement point fixed to the dam crest.



Figure 9. 3-D accelerometer response measurement point fixed to the dam water face.

The forcing signal and six response signals were acquired simultaneously using an 8-channel front end, a computer, and dedicated software. From this, frequency response functions (FRFs) were calculated and the modal parameters subsequently extracted. Figure 11 shows the modal indicator function (MIF), indicating the existence of nine physical modes with a maximum modal participation at mode 2, f = 9.90Hz. Table 1 gives the frequency and damping in percent of critical for the first six modes.

سیگنال نیروی محرک و شش سیگنال پاسخ همزمان با استفاده از مسیر ۸ کانالی ، یک کامپیوتر و یک نرم افزار اختصاصی به دست آمد. از این ، توابع پاسخ فرکانس (FRFs) محاسبه و پارامترهای مودال متعاقباً استخراج شدند. شکل ۱۱ عملکرد شاخص مودال (MIF) را نشان می دهد و بیانگر وجود ۹ مود فیزیکی با حداکثر مشارکت مودال در مود ۲ ، f = 9.90Hz است. جدول ۱ فرکانس و ضریب میرایی از درصد میرایی بحرانی برای شش مود اول را نشان می دهد. The test revealed that there is some relative movement between two adjacent blocks and that the movement at the dam foundation is not equal to zero. The latter indicates the existence of soil–structure interaction. These facts are discussed in more detail in [19] and [21].



Figure 10. Measurement point grid (dots) and location of the driving points 10 and 17 (crosses).

#### 2.5 Finite element modeling and updating

After completion of the tests, a preliminary FE model was updated using a dedicated software package [21]. Updating included the introduction of a soft layer between the blocks and optimizing the stiffness of the springs reflecting soil–structure interaction. The modal assurance criterion (MAC) value is used to compare the coincidence of two mode shapes. MAC = 1 (also given as MAC = 100%) means that two shapes are identical, MAC = 0 means that two shapes are orthogonal (completely different from each other). For the final model, MAC values comparing the mode shapes as determined experimentally and as calculated from the FE model are higher than 0.92 for the first five modes. This can be rated as "very good". Figure 12 shows a comparison between the frequencies and shapes of the first four modes as extracted from the experiment and as calculated using the FE model.

پس از اتمام آزمایشات ، مدل FE اولیه با استفاده از یک بسته نرم افزاری اختصاصی به روز شد [۲۱]. به روز رسانی شامل تعریف یک لایه نرم بین بلوک های بدنه سد و نیز بهینه یابی سختی فنرهای منعکس کننده اندرکنش خاک و سازه است. از معیار اطمینان مودال (MAC) برای مقایسه عمگرایی دو شکل مودی استفاده می شود . همچنین 1 = MAC یا MAC ای MAC – 100 ٪ بدین معنی است که دو شکل مودی یکسان هستند و MAC = 0 بدین معنی است که دو شکل متعامد (کاملاً متفاوت از یکدیگر) هستند. برای مدل نهایی ، مقادیر MAC جهت مقایسه اشکال مودی در حالت آزمایشاتی و اشکال مودی درحالت محاسباتی مدل FE ، برای پنج حالت اول بالاتر از ۱۹۲۲ است. این را می توان به عنوان "خیلی خوب" ارزیابی کرد. شکل ۱۲ مقایسه ای بین فرکانس ها و اشکال چهار مود اول را که از آزمایش و محاسبات مدل FE استخراج شده است را نشان می دهد .

# 3 NORSJO DAM"

# 3.1 The dam



Figure 11. Modal indicator function (MIF) for Vieux Emosson dam.

Table 1. Frequency and damping of the first six modes of Vieux Emosson da	am
---	----

Mode number Frequency (Hz)	Damping (%)
1 8.42	3.5
2 9.90	2.6
3 12.80	2.8
4 15.62	2.7
5 19.10	2.4
6 22.86	2.5

This wall and the dam's main structure are connected through a large number of reinforced concrete bars of 150mm × 150mm cross section positioned in a grid with a mesh width of 2.88m. Wooden planks are located on every second row of these concrete bars, which makes the downstream face of the main structure easily accessible over the whole dam height (Figure 16). This wall prevents the downstream face of the dam from freezing and hence from locking the water flow. Norsjo dam is part of a river exploitation system with" the turbines and generators located at the dam footing. Although the reservoir surface freezes in winter, the production of electricity continues throughout the year. Is a state to a state the reservoir surface freezes in winter, the production of electricity continues throughout the year. Is a state to a stat

# 3.2 The problem

A preliminary FE analysis performed at the Royal Institute of Technology, KTH, Stockholm [24], had shown that the behavior of the structure was strongly dependent on the real state of the boundary conditions: Where is the connection to the surroundings pinned, where is it elastic, and where is it clamped? Having a look at the cross section shown in Figure 15, it becomes clear that it is, e.g., not easy to predict the behavior of the connection between the footing of the dam and the rock. It was, therefore, the major goal of the tests described here to determine an FE model being as close to reality as possible.

آنالیز مقدماتی FE که در انستیتوی سلطنتی فناوری ، KTH، استکهلم انجام شده بود [۲۴] ، نشان داده بود که رفتار سازه بسیار به شرایط مرزی واقعی بستگی دارد. کدام تکیه گاه های مرزی شرایط مفصلی دارد و کدام گیردار وکدام الاستیک است؟ با نگاهی به مقطع نشان داده شده در شکل ۱۵ ، مشخص می شود که پیش بینی رفتار اتصال بین پایه سد و بستر سنگی آسان نیست. بنابراین ، هدف اصلی آزمایشاتی که در اینجا شرح داده شده اند این بود که یک مدل FE را تا حد امکان به واقعیت نزدیک کند.

#### 3.3 Preliminary ambient test

To get an idea of the dam fundamental natural mode a preliminary test was performed. Two facts resulted from this: (i) the dam fundamental frequency is  $f \approx 3.2$ Hz and (ii) operation of the turbines and generators located at the powerhouse at the dam bottom resulted in disturbing peaks in the dam vibration spectra (Figure 17). The very narrow peaks in the spectrum could all be related to either the Kaplan or the Francis turbine located at the powerhouse. This meant that testing was reasonable at times when the powerhouse was shut off only. As a consequence, tests were performed during the night and during weekends only and close cooperation with the powerhouse control center was necessary. The consequences of the dam natural frequency being  $f \approx 3$ Hz are discussed below.

برای بدست آوردن اطلاعات مودال سد، آزمایش مقدماتی انجام شد. دو واقعیت از این امر بدست آمد: (۱) فرکانس اصلی سد Hz ۳,۲ است و (۲) عملکرد توربین ها و ژنراتورهای مستقر در نیروگاه در پایین سد منجر به ایجاد پیک های مزاحم در طیف ارتعاش سد شده است (شکل ۱۷). پیک های بسیار باریک در طیف، همگی مربوط به توربین کاپلان یا توربین فرانسیس واقع در نیروگاه است. این بدان معناست که آزمایش در مواقعی که نیروگاه فقط خاموش باشد معقول است. در نتیجه، آزمایشات در طول شب و در آخر هفته انجام شد و همکاری نزدیک با مرکز کنترل نیروگاه ضروری بود. عواقب فرکانس طبیعی سد FH « در زیر بحث شده است.



Figure 12. Natural frequencies and mode shapes of the first four Vieux Emosson dam modes.



Figure 13. Norsjo dam. To the left, spillways and powerhouse."



Figure 14. Plan view of the Norsjo Dam and the adjacent structures.

# 3.4 The excitation

A similar servohydraulic shaker as for the Vieux Emosson tests was used (Figures 18 and 19). However, as there were no insurmountable problems with the accessibility of the dam here, a hydraulic power pack with an 80lmin<sup>-1</sup> capacity was chosen instead of the 40lmin<sup>-1</sup> power pack used for Vieux Emosson. The reason for this was the fact that the Norsjo dam fundamental frequency,  $f \approx 3.2$ Hz, lies significantly lower than the f = 8.42Hz of Vieux Emosson dam.

یک مولد لرزش سروو هیدرولیک مشابه تست های Vieux Emosson مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱۸ و ۱۹). با این حال ، از آنجا که هیچ مشکلی برای دسترسی به سد در اینجا وجود نداشت ، یک مجموعه مولد قدرت هیدرولیک با ظرفیت ۱-B0 اس ای به جای دستگاه ۱-40 ul mi مورد استفاده برای Vieux Emosson انتخاب شد. دلیل این واقعیت این بود که فرکانس اصلی سد نورسجو ، 3.2Hz ≈ f ، به طور قابل توجهی پایین تر از 8.42Hz = mد Dieux Emosson قرار دارد. The basic problem with any kind of vibration generator using inertial forces is the force produced being directly proportional to the acceleration of the moving mass and hence to the square of the frequency of excitation. This means that it is difficult to generate high forces at low frequencies. Whereas it was acceptable for Vieux Emosson dam to have an excitation spectrum being flat for f = 5,...,40Hz, it was preferred for Norsjo dam to dispose of a force<sup>--</sup> spectrum being flat for f = 2,...,40Hz. This could be achieved using the larger power pack because this allowed to make use of the full capacity of the 631 min<sup>-1</sup> servovalve and of the 250-mm-cylinder stroke for low frequencies. The forcing signal was of the continuous random type with a maximum force amplitude of 32kN (Figure 20).

مشکل اساسی تولید هر نوع ارتعاش با استفاده از نیروهای اینرسی این است که نیرویی اینرسی تولید شده مستقیماً با شتاب جرم متحرک و در نتیجه با مربع فرکانس تحریک متناسب است. این بدان معنی است که تولید نیروهای زیاد در فرکانسهای پایین دشوار است. در حالی که برای سد VieuxEmosson قابل قبول بود که طیف تحریکی مسطح برای ۵ تا ۴۰ هرتز باشد ، برای سد نورسجو ترجیح داده می شد طیف نیرو را مسطح برای ۲، ...، ۴۰ هرتز باشد این امر می تواند با استفاده از پاور برق بزرگتر بدست آید زیرا این امر باعث می شود از ظرفیت کامل سروولو و ظرفیت جابجایی ۲۵۰ میلی متر سیلندر برای فرکانس های کم استفاده شود. سیگنال نیرویی از نوع تصادفی و مداوم با حداکثر دامنه نیرو ۳۲ هربود (شکل



Figure 15. Norsj"o dam cross section. Figure 16. Between water (to the right) and air (to the

#### **18** Civil Engineering Applications

The standard problem with having enough electric power available to drive the power pack could be solved in a very elegant way here. If we need a 90-kW connection, we can simply plug into the local network (Figure 21). On the basis of the results of the preliminary FE analysis performed at KTH earlier [24], point 6 was chosen as the driving point (Figure 22). At the end of the first day of testing, this choice was confirmed through analyzing the results for the measurement points on the dam crest. The shaker was obviously not sitting in a node of the shape of a mode of concern.

مشکل داشتن انرژی الکتریکی کافی برای تجهیزات تولید برق می تواند به روش بسیار مناسب در اینجا حل شود. اگر به اتصال ۹۰ کیلوواتی نیاز داشته باشیم ، می توانیم به راحتی به شبکه محلی وصل شویم (شکل ۲۱). براساس نتایج حاصل از تحلیل مقدماتی FE که در KTH پیش از این انجام شده بود [۲۴] ، نقطه ۶ به عنوان نقطه قرارگیری شیکر انتخاب شد (شکل ۲۲). در پایان روز اول آزمایش ، این تحلیل توسط آنالیز نتایج مربوط به داده های اندازه گیری روی تاج سد تأیید شد. ظاهرا شاکر در گره ای از شکل مودی مورد نگرانی قرار نداشت.

# 3.5 The response

The measurement point grid consisted of 227 three dimensional measurement points distributed over the dam crest and the downstream face (Figure 22). This grid was subsequently extended to the rock foundations and to the spillway and inlet/powerhouse structures, where accessible. The number of measurement points thus increased to 270. The full measurement point grid is reflected in the graphics shown in Figures 30–33.

Three sensor units consisting of three Bruel&Kjær<sup>®</sup> 8306 accelerometers (Figure 23) and a fourth unit consisting of three PCB 393B31 accelerometers (Figure 24) were used simultaneously. Both sensor types have similar specifications (Section 2.3).

#### 3.6 Signal acquisition and processing

The forcing signal and 12 response signals were acquired simultaneously using a 16-channel front end, a computer, and dedicated software (Figure 25). The sampling rate was s = 100Hz, the length of a time window was roughly T = 41s. No disturbing effects due to nonstationary environmental conditions leading to system nonlinearities were to be observed. Water-level variations in the reservoir were less than 100mm for the whole week of testing. From the time signals, FRFs averaged over eight times windows were calculated and the modal parameters extracted. Both, the driving point FRF (Figure 26) and the MIF (Figure 27), indicate the existence of 12 natural modes in the frequency range f = 3,...,13.5Hz.

سیگنال ارتعاش اجباری و ۱۲ سیگنال پاسخ همزمان با استفاده از لاگر ۱۶ کاناله ، یک کامپیوتر و یک نرم افزار اختصاصی به دست آمد (شکل ۲۵). میزان نمونه برداری ۲۰۰ Hz بود ، طول یک پنجره زمان تقریباً 41s = T بود. اثرات مخرب سیگنال ناشی از شرایط محیطی غیراستایی بودن که منجر به غیرخطی بودن سیستم شود مشاهده نشد. تغییرات سطح آب در مخزن برای کل هفته آزمایش کمتر از ۱۰۰ میلی متر بود. میانگی FRFها برای بیش از هشت پنجره زمانی محاسبه شدند و پارامترهای مودال آنها استخراج شدند. ۱۲ مد طبیعی در محدوده فرکانس f = 3 شناسایی شدند.



Figure 17. Spectrum of the Norsjo dam vibrations measured with the" powerhouse under operating conditions.



Figure 18. The servohydraulic shaker fixed to the Norsjo<sup>®</sup> dam crest. In the background, the air-sprung hydraulic power pack to the left and the air cooler to the right. Figure 19. Load cell between the cylinder and the supporting structure.

The shape at the crest, the deformation type, frequency, and the percentage of critical damping of the 12 modes identified are given in Figure 28. Three basically different shape types can be distinguished: antimetric horizontal bending (AHB), symmetric horizontal bending (SHB), and vertical bending (VB). The horizontal bending modes follow the well-known schedule of an arch-type structure. There is no horizontal bending mode without a node in the crest shape. However, the respective crest shape appears at mode 6, which turns out to be a VB mode(Figure 28).

شکل مودی در تاج ، نوع تغییر شکل ، فرکانس و درصد میرایی بحرانی هر ۱۲ مود شناسایی شده در شکل ۲۸ آورده شده است. سه نوع شکل مختلف با هم قابل تشخیص است: خمش افقی ضد متقارن (AHB) ، خمش افقی متقارن ( SHB) و خم عمودی(VB) . مود های خم افقی از یک رفتار قابل پیش بینی برای یک سازه قوسی پیروی می کنند. هیچ مود خمشی افقی بدون گره در تاج وجود ندارد. با این حال، شکل تاج مربوطه در مود ۶ ظاهر می شود ، که معلوم می شود مودعمودی است. شکل ۲۸ Unfortunately, it is not possible to discuss all details concerning modes shapes here, in detail. However, to summarize, for all modes, the crest shape indicates the dam being simply supported at the spillway side and completely clamped in at the rock side (Figure 28). The vertical shape of the modes indicates the boundary condition rock/structure at the dam bottom-line to be elastic with being closer to simply supported than to fully clamped in (Figures 30–33).

متأسفانه بحث در مورد جزئیات اشکال مودال در اینجا به تفصیل امکان پذیر نیست. با این حال ، به طورخلاصه، برای همه مودها ، شکل تاج نشان می دهد که سد با تکیه گاه ساده در قسمت سرریز و با تکیه گاه کاملاً گیردار در قسمت صخره ای پشتیبانی می شود (شکل ۲۸). شکل عمودی



Figure 20.Spectrum of the force introduced into Norsjo dam with the shaker."Figure 21.Swedish–Swiss 90-kW power connection.

# 3.7 Finite element modeling and updating

The FE model for Norsjo" dam consisted of roughly 1000 solid elements representing the dam's main structure, 1500 plate elements representing the secondary wall on the downstream side, and 500 beam elements for the connections "main structure—secondary wall". The boundary conditions in the structure/rock contact area were modeled using three-dimensional elastic springs. Upon updating using a dedicated software package, a quite nice correlation between the experimental and analytical modes could be achieved (Table 2 and Figure 29). This applies, above all, for the first five modes where not only MAC is between 0.8 (80%) and 0.95 (95%) but also the sequence of the modes is the same for experiment and modeling. For the higher modes, there is some disorder in the mode sequence and MAC is between 0.58 and 0.86. Further discussion in this matter can be found in [22]. In Figures 30–33, the experimental and the analytical mode shapes are displayed overlaid; the wire-framed shape shows the experimental results.

مدل FE برای سد نورسجو شامل تقریباً ۱۰۰۰ المان solid نمایانگر سازه اصلی سد ، ۱۵۰۰ المان صفحه plate نمایانگر دیوار ثانویه در طرف پایین دست و ۵۰۰ المان تیر beam برای اتصالات "سازه اصلی – دیوار ثانویه" است. شرایط مرزی در قسمت اتصال سازه با بستر با استفاده از فنرهای الاستیک سه بعدی مدل شد. با وجود به روزرسانی مدل المان محدود با استفاده از یک بسته نرم افزاری اختصاصی ، همگرایی کاملا خوبی بین مودهای تجربی و تحلیلی حاصل می شود (جدول ۲ و شکل ۲۹). در پنج مود اول نه تنها MAC بین ۸٫۰ (۰۸٪) و ۰٫۹۵ (۵۹٪) است ، بلکه توالی مودها هم برای حالات آزمایش و مدل یکسان است. در مود های بالاتر ، یک اختلال در دنباله حالت وجود دارد و MAC بین ۸٫۵ و ۰٫۵۵ بین ۲٫۵۰ است. بحث بیشتر در این زمینه را می توان در [۲۲] یافت. در شکل های ۳۰–۳۳ ،اشکال مودی تجربی و تحلیلی به نمایش گذاشته شده است

# 4 MAUVOISIN DAM

#### 4.1 Introduction

The goal of the tests discussed here was to prove that it is also possible to determine the dynamic properties of a large dam using ambient methods. To investigate into the effect of the reservoir water level on the dam dynamic characteristics, the dam was tested seven times. Subsequent continuous monitoring of the dam during 180 days in 1998/1999 as well as comparison of ambient dam vibrations and vibrations induced by an earthquake occurring during this time is discussed in detail in [25].

هدف از آزمایش های مورد بحث در اینجا اثبات این موضوع است که می توان با استفاده از روشهای ارتعاش محیطی ، خصوصیات دینامیکی یک سد بزرگ را تعیین کرد. برای بررسی تأثیر سطح آب مخزن بر خصوصیات دینامیکی سد ، این سد هفت بار مورد آزمایش قرار گرفت. پایش مستمر سد در طی ۱۸۰ روز در سال ۱۹۹۹/۱۹۹۸ و همچنین مقایسه ارتعاشات محیطی سد و ارتعاشات ناشی از وقوع زلزله در این مدت به تفصیل در [۲۵] بحث شده است.





**Figure 22.** Norsjo Dam: primary measurement point grid as seen from the downstream side. Later on this was extended<sup>--</sup> to also cover the spillways and powerhouse. Point 6 indicates the driving point where the shaker was located.



Figure 23. Norsjo Dam: 3-D measurement point with" Bruel & Kjær sensors."

Figure 24. Norsjo Dam: 3-D measurement point with" PCB sensors.

# 4.2 The dam

Mauvoisin dam is a double-curved concrete arch dam with a height of 250m and a crest length of 520m (Figure 34). The dam width is 12m at the crest and 53m at the foundation. The crest lies at 1976m above sea level. The dam consists of 2.1 million cubic meters of concrete; the reservoir has a volume of 204 million cubic meters. Mauvoisin dam is owned by the Forces Motrices de Mauvoisin SA, Sion, Switzerland. The tests described here were financed



Figure 25. The measurement center on Norsjo dam crest."



**Figure 26.** Norsjo Dam: driving point 6 FRF for the x,y, and z directions. through an EMPA research project [26, 27].

سد مائوئیزین یک سد بتنی دو قوسی با ارتفاع ۲۵۰ متر و طول تاج ۵۲۰ متر است (شکل ۳۴). عرض سد ۱۲ متر در تاج و ۵۳ متر در پایه است. تاج در ارتفاع ۱۹۷۶متری از سطح دریا قرار دارد. این سد از ۲٫۱ میلیون متر مکعب بتن تشکیل شده است. حجم مخزن ۲۰۴ میلیون متر مکعب است. سد ماویوزین متعلق به Sion ، Force Motrices de Mauvoisin SAهایی Switzerland است. آزمایشاتی که در اینجا شرح داده شد از طریق یک پروژه تحقیقاتی EMPA تأمین مالی می شدند [۲۶ ، ۲۷] When it comes to planning a dynamic test on a dam, one of the first problems to deal with is the accessibility of the measurement points. Usually, small and medium-sized dams like Vieux Emosson dam do not have horizontal inspection galleries between the crest and the foundation. A gallery at the foundation is not very interesting from the point of view of dam dynamics. It is used to connect vertical galleries allowing for checking of the dam static deformations and to check for possible incoming water. The conditions at Norsjo dam were very fortunate allowing installing a very tight grid of measurement points and hence determining the mode shapes with an extraordinary high resolution. In this respect, Mauvoisin dam is somehow in-between the two.

هنگامی که نوبت به برنامه ریزی یک آزمایش دینامیکی روی یک سد می رسد ، یکی از اولین مشکلات روبرو، دسترسی به نقاط اندازه گیری است. معمولاً سدهای کوچک و متوسط مانند سد Vieux Emosson دارای گالری های بازرسی افقی بین تاج و پایه نیستند. وجود یک گالری در پی سد از منظر مطالعات رفتار دینامیکی سد خوشایند نیست. از این گالری ها برای اتصال گالری های عمودی استفاده می شود که امکان بررسی تغییر شکل استاتیک سد و بررسی آب ورودی احتمالی را فراهم می آورد. شرایط در سد نورسجو خوشبختانه این گونه بود که امکان نصب یک شبکه بسیار متراکم از نقاط اندازه گیری وجود داشت و از این رو تعیین اشکال مودال با وضوح فوق العاده را فراهم می آورد. از این منظر ، سد ماویوزین به نوعی در بین این دو حالت قرار دارد.

The nice thing with Mauvoisin dam is that, as a consequence of the dam height having been increased in 1990, there is very large gallery at the old crest level, 1961m above sea level (Figure 35). In the snow-free seasons, this gallery is accessible with trucks and provides a very nice sheltered area at an interesting dam level. Further galleries are at 1957, 1885, 1837, and 1789m and at the foundation, 1728m above sea level. With the exception of the 1837-m gallery, all the galleries are accessible through an elevator at the east side of the dam.

نکته جالب در مورد سد مائوئیزین این است که پس از افزایش ارتفاع سد در سال ۱۹۹۰ ، گالری بسیار بزرگی در سطح تاج قدیمی ، ارتفاع ۱۹۶۱ متر از سطح دریا وجود دارد (شکل ۳۵). در فصول بدون برف ، این گالری با کامیون ها قابل دسترسی است و یک محل بسیار مناسب را در ارتفاع ایده آلی از سد فراهم می کند. گالری های دیگری در تراز ۱۹۵۷ ، ۱۸۸۵ ، ۱۸۲۷ و ۱۸۲۹متر و در پایه در تراز ۱۷۲۸متری از سطح دریا قرار دارند. به استثنای گالری ۱۸۳۷ متر ، تمام گالری ها از طریق آسانسور در ضلع شرقی سد قابل دسترسی هستند.



Figure 27. Norsjo Dam: modal indicator function, MIF."

# 4.3 The test program

Figure 36 shows the relationship between the seven tests performed (phase 1–7) and the reservoir water level.

# 4.4 The excitation

Although ambient tests were planned, excitation has to be a topic here. Taking a look at the Mauvoisin installation scheme, it becomes clear that several "disturbing vibration generators" exist (Figure 37). Operation of the Chanrion powerhouse located close to the dam crest was easy to identify and to work around (Figure 38). This "work around" is discussed in more detail in Section 4.6.

همانطور که آزمایش های محیطی برنامه ریزی شده بودند ، موضوع ایجاد تحریک نیز باید در اینجا مورد توجه قرار میگرفت. با نگاهی به برنامه نصب سد مائوئوین ، روشن می شود که چندین "ژنراتور ایجاد ارتعاش" وجود دارند (شکل ۳۷). بهره برداری از نیروگاه Chanrion واقع در نزدیکی تاج سد به راحتی قابل تعریف و کار در اطراف بود (شکل ۳۸). این موصوع با جزئیات بیشتر در بخش ۴۶ بحث



**Figure 28.** Frequency, damping in percent of critical and crest mode shape for the 12 first modes of Norsj= symmetric horizontal bending, and VB = vertical bending. The spillway side is too dam. AHB<sup>...</sup> = the left, the "rock side" to the right of the shape.

analysis (EMA) and MAC values comparing the mode shap						
Mode pair	FEA number	Frequency (Hz)	EMA number	Frequency (Hz)	MAC (%)	
1	1	3.66	1	3.55	87.4	
2	2	3.71	2	3.64	79.5	
3	3	4.64	3	4.44	95.8	
4	4	4.92	4	5.00	94.7	
5	5	6.16	5	6.45	89.2	
6	6	7.70	7	8.31	58.6	
7	9	8.13	6	7.89	83.1	
8	10	8.85	8	8.85	86.1	
9	11	9.48	10	10.51	72.8	
10	12	9.75	9	9.97	77.2	
11	13	10.81	11	11.48	74.6	
12	14	11.58	12	12.91	69.4	
T 1					C .1	

Table 2. Norsjo dam natural frequencies as calculated<sup>--</sup> finite element analysis (FEA) and as measured experimental modal analysis (EMA) and MAC values comparing the mode shapes

It took some time to find out that operation of the Fionnay power station had quite bad effects on the signals measured. Opening and closing of the valves controlling the water flow to the turbines produced shock waves traveling back to the dam and significantly disturbing the dam's natural vibrations. As these processes could not be easily controlled, tests were performed with the Fionnay power station being out of operation for phases 2–7. مدتی طول کشید تا دریابیم که عملکرد نیروگاه Fionnay back to the dam and significantly disturbing the dam's natural vibrations. As these processes could not be easily controlled, tests were performed with the Fionnay power station being out of operation for phases 2–7. مدتی طول کشید تا دریابیم که عملکرد نیروگاه Fionnay تأثیرات کاملاً بدی روی سیگنالهای اندازه گیری شده دارد. باز و بسته شدن دریچه های کنترل کننده جریان آب به توربین ها باعث ایجاد امواج شوک بازگشت کننده به سد شده و به طور قابل ملاحظه ای ارتعاش های طبیعی سد را مختل می کند. از آنجا که این فرایندها به راحتی قابل کنترل نیستند ، آزمایشات با استفاده از ارتعاش نیروگاه Fionnay برای فازهای ۲–۷ از مدتر را مختل می کند. از آنجا که این فرایندها به راحتی قابل کنترل نیستند ، آزمایشات با استفاده از ارتعاش نیروگاه tionay برای فازهای ۲–۷ از دستور کار خارج شد.

Furthermore, problems arose with changing wind conditions. This is discussed in detail in [26, 27].

علاوه بر این ، با تغییر شرایط باد مشکلاتی بوجود آمده است. این در جزئیات در [۲۶ ، ۲۷] بحث شده است.

Summarizing here, the level of the dam vibrations was significantly influenced by the wind conditions. Therefore, not all the maximum 16dam natural modes could be identified for all seven tests performed (Section 4.8).

#### 4.5 The response

The dam vibrations were measured using threedimensional force balanced accelerometers, Kinemetrics FBA-23, and one-dimensional FBA-11. These have a full-scale range of  $\pm 0.5g$ , a sensitivity of  $5Vg^{-1}$  and a dynamic range of 140dB for frequencies f = 0,...,10Hz. The 16-channel signalconditioning hardware consisting of amplifiers and filters is described in detail in [26].

Seven tests were performed between June 1995 and October 1996 (Figure 36). All the measurement points shown in Figure 39 were covered in one of these tests only. For the other tests, the measurement points were located on the "old crest" level only.

هفت آزمایش بین ژوئن ۱۹۹۵ و اکتبر ۱۹۹۶ انجام شد (شکل ۳۶). تمام نقاط اندازه گیری نشان داده شده در شکل ۳۹ فقط مربوط به یکی از آزمایش ها بوده است. برای آزمایش های دیگر ، نقاط اندازه گیری فقط در سطح "تاج قدیمی" قرار داشتند.

This is quite easy to understand, because distributing the cables from the "old crest" level, where the measurement center was located, to the lower galleries was very difficult and very time consuming. It can be seen from Figure 34 that from two of the lower galleries access to a device mounted on the dam air side was possible. Let us call this device an "air ladder". Here, the cables could be led down to a lower gallery through the air. Access to the gallery without this air ladder was possible through a vertical tunnel only. This was quite a bad experience. Another bad experience was the fact that Mauvoisin dam is one of the favorite places for base jumpers to practice. The opening of their parachutes sounds very much like an explosion and if we are situated on one of these air ladders and do not hear them coming, and their parachutes open some meters from us, we are in for a shock.

درک این امر بسیار آسان است ، زیرا توزیع کابل های حسگرها از سطح "تاج قدیمی" ، که مرکز اندازه گیری در آن واقع شده بود ، به گالری های پایین کار بسیار دشوار و بسیار وقت گیر بود. از شکل ۳۴ می توان دریافت که از بین دو تا از گالری های پایین دسترسی به دستگاه نصب شده در سمت بیرونی سد امکان پذیر بود. بگذارید این دستگاه را "نردبان بیرونی" بنامیم. در اینجا ، کابل ها را می توان از طریق کانال به یک گالری پایین تر هدایت کرد. دسترسی به گالری بدون این نردبان فقط از طریق یک تونل عمودی امکان پذیر بود. این یک تجربه کاملاً بد بود. یک تجربه بد دیگر این واقعیت بود که سد مائوئوزین یکی از مکان های مورد علاقه برای تمرین چتربازها است. باز شدن چتر نجات آنها بسیار شبیه انفجار است و اگر ما در یکی از این نردبان ها قرار داشته باشیم و نشنویم که آنها در حال آمدن هستند و چتر نجات آنها چند متری از ما باز شود ، ما در شوک قرار خواهیم گرفت.



Figure 29. Norsjo Dam: graphical representation of the MAC values comparing the mode shapes as calculated (FEA)<sup>--</sup> and as measured (EMA).



Figure 30. Norsjo" Dam: finite element model and measurement point grid overlaid.



Figure 31. Norsjo dam mode pair 1."



Figure 32. Norsjo dam mode pair 5."



Figure 33. Norsjo dam mode pair 7."



Figure 34. Photo of Mauvoisin dam downstream face. The "air ladders" mentioned in Section 4.5 can be seen.



Figure 35. Mauvoisin dam. Topology of blocks and galleries as seen from downstream. The elevator is indicated to the right.



Figure 36. The seven test phases and the respective reservoir water level.



# 4.6 Signal acquisition and processing

The sampling frequency was s = 40Hz, the length of the time window acquired per setup was either T = 54s or T = 108s. Figure 40 shows a typicall time signal for both a low-level and a high-level ambient excitation state. The amplitude ratio is about 1:30.

The signals were processed by Andreas Felber using the software package that he had developed[9]. **Figure 37.** The Mauvoisin exploitation system.



**Figure 38.** Typical frequency spectrum for the upstream/downstream direction with the Chanrion powerhouse in operation. ANPSD = averaged normalized power spectral density. Frequency values in parentheses are machine-excited harmonic vibrations.



Figure 39. Mauvoisin dam measurement point grid as seen from downstream.

Today, his method is called peak picking. This means that the amplitude and phase relationships between the signals of a reference sensor, degree of freedom (DOF), and a roving sensor DOF is calculated for the frequency line manually picked from the spectrum. The advantage of this procedure is that peaks representing machine-induced harmonic vibrations can easily be kept out of the signal processing (Figure 38). This is not the case for traditional modal analysis procedures used for FVT tests where signal processing is automated. The same would also apply to modern stochastic subspace identification (SSI) techniques [11], used to process ambient tests in the time domain. In the last two years, the problem of automatically removing "disturbing" peaks related to machine-induced, purely harmonic vibrations from automated signal-processing algorithms, has been successfully dealt with in [12]. These algorithms consider the fact that the kurtosis of a natural structural vibration and of machine-excited purely harmonic vibration is not the same. Hence, the algorithm checks the kurtosis for every peak in the frequency spectrum (transferred back to time domain) and takes out the "bad" ones.

امروزه روش او انتخاب نقاط اوج ( peak picking ) نامیده می شود. این بدان معنی است که دامنه و روابط فازی بین سیگنال های یک سنسور مرجع ، درجات آزادی (DOF) و سنسورهای متحرک، به طور دستی از طیف برداشت می شود. مزیت این روش این است که قله هایی که ارتعاشات هارمونی ناشی از ماشین تحریک کننده ایجاد میکند را می توان به راحتی از پردازش سیگنال خارج کرد (شکل ۳۸). این مورد در مورد روشهای سنتی تجزیه و تحلیل مودال مورد استفاده برای آزمایشهای FVT که پردازش سیگنال به صورت خودکار انجام می شود کاربرد ندارد. همین امر همچنین در مورد تکنیکهای مدرن (SSI) [۱۱] ، که برای پردازش تست های محیطی در حوزه زمان استفاده می شود ، صدق می کند. در دو سال گذشته ، مسئله حذف خودکار قله های "مزاحم" مربوط به ارتعاشات کاملاً هارمونی ناشی از ماشین لرزه، توسط الگوریتم های خودکار پردازش سیگنال ، با موفقیت در مرجع ۱۲ حل شده است. این الگوریتم ها این واقعیت را در نظر می گیرند که kurtosis یکسان نیست.

Finally, Felber's software packages did not deal with damping. Therefore, damping is not a topic here. Helmut Wenzel later on extended the Felber software packages with a routine to estimate damping.

سرانجام ، بسته های نرم افزاری Felber با میرایی روبرو نبود. بنابراین ، میرایی در اینجا موضوعی نیست. بعداً هلموت ونزل بسته های نرم افزاری Felber را به طور معمول برای برآورد میرایی افزایش داد.





**Figure 40.** Typical acceleration time signal as acquired at block 7 of Mauvoisin dam for phase 1, water level 1849m (a) and for phase 2, water level 1924m (b).

Estimation of damping coefficients from ambient tests is included in modern commercial signal-processing software packages.

# 4.7 Modal parameters

Figure 41 shows the Mauvoisin dam crest shape for the first eight modes determined for a water level of 1.849m. As for Norsjo dam, there is no node-free<sup>--</sup> mode shape for horizontal bending.

#### 4.8 Influence of the reservoir water level



Figure 41. Mode shapes of Mauvoisin dam crest as determined for phase 1, water level 1849m.



Figure 42. Frequencies of modes 1–16 of Mauvoisin dam as identified for different reservoir water levels.



Figure 43. Frequencies of modes 1, 2, and 6 of Mauvoisin dam as identified for different reservoir water levels.

Figure 42 shows the natural frequencies of the first 16 modes of Mauvoisin dam as a function of the reservoir water level. Missing points indicate that it was not possible to identify the respective mode. This was mainly due to a bad signal-to-noise ratio for the respective frequency.

The results for the "best identified" modes 1, 2, and 6 are shown in Figure 43 and the phases 1–7 are identified.

Citing from the conclusions given in [25]: "The stiffening of the dam due to increasing hydrostatic pressure is more important than the added hydrodynamic masses for lower water levels. This trend is reversed for higher water levels."

# REFERENCES

- [1] Darbre GR. Strong-motion instrumentation of dams. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1995 24:1101– 1111.
- [2] Wyss A. Swiss National Strong Motion Network. Strong Motion Bulletin January 2004—December 2004, Publication Series of the Swiss Seismological Service 117. Swiss Federal Institute of Technology: Zurich, 1995.
- [3] Duron ZH, Hall JF, Fink K, Strasser E. Measuring hydrodynamic pressures during forced vibration testing of dams. Dam Engineering 1991 2:337–355.
- [4] Proulx J, Paultre P. Etude Experimentale et Numérique du Comportement Dynamique du Barrage-Poids Outardes 3, Rapport de Recherche SMS-94/03. Universite de Sherbrooke, 1994.
- [5] Fanelli M, Giuseppetti G, Bettinali F, Galimberti C, Castoldi A, Casirati M, Pizzigalli E, Lozza S, Ruggeri G. Seismic monitoring of dams, A new active surveillance system: basic criteria, operating methods and results obtained. Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo-Kyoto, August 2–9, 1988; pp. VI-409–VI-414.
- [6] Fanelli M, Giuseppetti G, Castoldi A, Bonaldi P. Dynamic characterisation of Talvacchia Dam: experimental activities, numerical modelling, monitoring. Earthquake Engineering. Tenth World Conference. Balkema Rotterdam. ISBN 90 54 10 060 5, 1992; 2689–2694.

- [7] Mendes P, Oliveira Costa C, Almeida Garrett J, Oliveira S. Development of a monitoring system to Cabril Dam with operational modal analysis. Proceedings of the 2nd International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, EVACES'07. Porto, October 24–26, 2007; pp. 1015–1023.
- [8] Cooley JW, Tukey JW. An algorithm for machine calculation of complex Fourier series. Mathematics of Computation 1965 **19**:297–301.
- [9] Felber A. Development of A Hybrid Bridge Evaluation System, Ph.D. Thesis. University of British Columbia: Vancouver, BC, 1993.
- [10] Van Overschee P, De Moor B. Subspace Identification for Linear Systems: Theory Implementation—Applications. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, 1996.
- [11] Brincker R, Andersen P. Ambient response analysis—modal analysis for large structures. Proceedings of the 6th International Congress on Sound and Vibration. Copenhagen, 1999.
- [12] Brincker R, Andersen P, Jacobsen NJ. Automated frequency domain decomposition for operational modal analysis. Proceedings of the 25th International Modal Analysis Conference. Orlando, FL, 2007.
- [13] Tilly GP (ed). Dynamic Behaviour of Concrete Structures, Report of the RILEM 65MDB Committee,
  Vol. 13. Developments in Civil Engineering, Elsevier Science Publishers: Amsterdam, ISBN 0-444-426 24-8, 1986.
- [14] Calciati et al. Experience Gained During in situ Artificial and Natural Dynamic Excitation of Large Concrete Dams in Italy, ICOLD 13, Q51, R32.
- [15] Severn RT, Jeary AP, Ellis BR. Forced vibration tests and theoretical studies on dams. Proceedings of the Institute of Civil Engineers. Vol. 69, Part 2, 1981; pp. 605–634.
- [16] Deinum PJ, Dungar R, Ellis BR, Jeary AP, Severn RT, Read GAL. Vibration tests on Emosson arch dam, Switzerland. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1982 10:447–470.
- [17] Flesch R, Eiselmayer M. Dynamic in-situ tests on Kolnbrein arch dam." Proceedings of the 7th World Conference on Earthquake Engineering. Istanbul, 1980.
- [18] Flesch R, Eiselmayer M. Dynamic behavior of arch dams. Proceedings 7th European Conference on Earthquake Engineering. Athens, 1982.
- [19] Cantieni R, Deger Y, Pietrzko S. Modal analysis of a concrete gravity dam: experiment, finite element analysis and link. Proceedings 12th International Modal Analysis Conference. Honolulu, HI, 1994; pp. 441–448.
- [20] Pietrzko S, Cantieni R. Modal testing of a gravity dam—Influence of the exciter placement on the quality of the identified modal parameters. Proceedings 12th International Modal Analysis Conference. Honolulu, HI, 1994; pp. 1342–1348.
- [21] Deger Y. Modal analysis of a concrete gravity dam—linking FE analysis and test results. Paper presented at The MSC European User's Conference. Vienna, 1993.
- [22] Cantieni R, Wiberg U, Pietrzko S, Deger Y. Modal investigation of a dam. Proceedings of the 16th International Modal Analysis Conference. Santa Barbara, CA, 1998; 1151–1157.
- [23] Cantieni R. Assessing a dam's structural properties using forced vibration testing. Proceedings IABSE International Conference on Safety, Risk and Reliability—Trends in Engineering. Malta, 2001; pp. 1001–1006.
- [24] Stromberg A, Wiberg A." En Valvdamms Dynamiska Egenskaper—Numerisk Medellering Med FEM, TRITA-BKN. Examensarbete 48, Byggnadsstatik 1995, Kungl Tekniska Hogskolan, Institutuonen f. or. Byggkonstruktion, S-100 44 Stockholm; ISSN 11034297, ISRN KTH/BKN/EX—48-SE.
- [25] Darbre GR, Proulx J. Continuous ambient-vibration monitoring of the arch dam of Mauvoisin. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2002 31:475–480.
- [26] de Smet CAM, Kramer C, Darbre GR. Ambient" tests at the dam of Mauvoisin. Proceedings of the 16th International Modal Analysis Conference. Santa Barbara, CA, 1998; pp. 1144–1150.

[27] Darbre GR, de Smet CAM, Kraemer C. Natural frequencies measured from ambient response of the arch dam of Mauvoisin. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2000 29:577–586.