



Structural health monitoring of concrete dams using modern methods (Case study: Baghan Jam Dam)

Seyed Shahab Emamzadeh^{*1}, Mostafa Heydari²

1 Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Kharazmi University, Tehran, Iran.

2 Kangan Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran.

Corresponding Author email: shemamzadeh@khu.ac.ir

© The Author (s) 2025

Received: 27 Oct 2024

Revised: 08 Jan 2025

Accepted: 29 Apr 2025

Published: 01 May 2025

Extended Abstract

Introduction

Structural Health Monitoring (SHM) has emerged as a critical technology in civil engineering for assessing the performance of vital infrastructure such as concrete dams. Given the importance of dams in water supply networks and the catastrophic consequences of their failure, developing non-destructive and accurate monitoring methods is essential. This study focuses on concrete dams, examining modern SHM techniques and their applications in detecting both visible and hidden structural damage. The discussed methods include modal analysis, neural networks, pattern recognition, Kalman filtering, statistical approaches, and signal processing, each evaluated for their accuracy, advantages, and limitations. The primary objective is to propose solutions for reducing maintenance costs, anticipating potential hazards, and minimizing human and financial losses through intelligent monitoring systems. As a case study, the health monitoring system for the Baghan Jam Roller-Compacted Concrete (RCC) Dam was designed and analyzed.

Materials and Methods

This research first introduced and compared various damage detection methods for concrete dams, including modal analysis, neural networks, pattern recognition, Kalman filtering, statistical methods, and signal processing. Subsequently, as a case study, the SHM system for the Baghan Jam RCC Dam was designed using the finite element method. To assess the site effect, three different soil-layer models (single-layer, two-layer, and three-layer) were examined. Sensor placement criteria were based on von Mises stress (exceeding 1.5 MPa) and displacement (exceeding 1 cm). To evaluate the system's performance under seismic loads, three earthquake records with varying hazard levels—Bam (PGA=0.8), Koina (PGA=0.6), and El Centro (PGA=0.35)—were utilized. Data from these records were extracted from the Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center and imported into ABAQUS software. Dynamic analyses were conducted to identify critical areas and optimize sensor placement.

Results and Discussion

The results demonstrated that the number and location of required sensors depend on seismic hazard intensity. For high hazard levels (PGA>0.7), 18 sensors (8 stress sensors and 10 displacement sensors) were recommended; for moderate levels (0.4<PGA<0.7), 14 sensors (6 stress sensors and 8 displacement sensors); and for low levels (PGA<0.4), 9 sensors (4 stress sensors and 5 displacement sensors). Stress and displacement analyses revealed that areas with high tensile stress



and significant displacement are critical for sensor installation. Comparative evaluation of SHM methods indicated that combining modal analysis with neural networks significantly improves damage detection accuracy. The Hilbert-Huang transform was confirmed as an effective method for identifying instantaneous damage in concrete structures.

Conclusion

This study underscores the importance of continuous monitoring for concrete dams, particularly in seismic-prone regions, and demonstrates that intelligent monitoring systems can enhance safety and extend the service life of critical infrastructure. The findings suggest that optimizing SHM systems by considering seismic hazard levels and stress/displacement criteria can reduce maintenance costs and prevent catastrophic failures. Future research should explore hybrid methods, such as integrating machine learning with wireless sensor networks, to improve monitoring precision and efficiency. Additionally, non-contact techniques like Digital Image Correlation (DIC) and drone-based monitoring could complement traditional sensors.

Keywords: Structural health monitoring (SHM), Concrete Dams, Non-destructive methods, Modal analysis, Smart sensors, Baghan Jam Dam

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Seyed Shahab Emamzadeh: Writing, Methodology, Investigation & Data Collection, Software, Analysis; **Mostafa Heidari:** Supervision, Text Editing, Data Collection & Completion.

Citation:

Emamzadeh, S. S., & Heydari, M. (2024). Structural health monitoring of concrete dams using modern methods (Case study: Baghan Jam Dam). *Technical Strategies in Water Systems*, 2(4): 315-327.

<https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1122688>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



پایش سلامت سازه‌های سدهای بتنی با استفاده از روش‌های نوین (مطالعه موردی: سد باغان جم)

سیدشهاب امامزاده^{۱*} مصطفی حیدری^۲

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

۲. دانشگاه آزاد اسلامی واحد کنگان، بوشهر، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: shemamzadeh@khu.ac.ir

© The Author (s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۲/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۶

چکیده

این مطالعه به بررسی روش‌های نوین پایش سلامت سازه‌ها (SHM) با تمرکز بر سدهای بتنی پرداخته و کاربرد این روش‌ها را در تشخیص آسیب‌های آشکار و پنهان سازه‌ای تحلیل می‌کند. روش‌های مورد بحث شامل تحلیل مودال، شبکه‌های عصبی، تشخیص الگو، فیلتر کالمان، روش‌های آماری و تحلیل سیگنال است که هر یک از منظر دقت، مزایا و محدودیت‌ها ارزیابی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب این روش‌ها می‌تواند به کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، پیش‌آگاهی از مخاطرات و کاهش تلفات جانی و مالی منجر شود. به‌عنوان مطالعه موردی، سیستم پایش سلامت سد بتن غلتکی باغان جم با استفاده از روش اجزای محدود طراحی شده است. برای تحلیل اثر ساختگاه، سه مدل مختلف با لایه‌بندی خاک (تک‌لایه، دو لایه و سه لایه) بررسی شد. معیارهای نصب حسگرها بر اساس تنش فون مایسز (بیش از ۱/۵ مگاپاسکال) و جابجایی (بیش از ۱ سانتیمتر) تعیین گردید. نتایج برای سه سطح خطر لرزه‌ای (زیاد، متوسط و کم) نشان داد که تعداد حسگرهای مورد نیاز متناسب با شدت خطر: سطح خطر زیاد: (۱۸ حسگر $PGA > 0.7$) حسگر ۸ حسگر تنش‌سنج و ۱۰ جابجایی‌سنج)، سطح خطر متوسط: (۱۴ حسگر $0.4 < PGA < 0.7$) حسگر ۶ تنش‌سنج و ۸ جابجایی‌سنج)، سطح خطر کم: (۹ حسگر $PGA < 0.4$) تنش‌سنج و ۵ جابجایی‌سنج) تغییر می‌کنند. این پژوهش بر اهمیت پایش مستمر سدها به‌ویژه در مناطق لرزه‌خیز تأکید دارد و نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های هوشمند پایش می‌تواند به بهبود ایمنی و افزایش عمر مفید سازه‌های حیاتی کمک شایانی نماید.

واژه‌های کلیدی: پایش سلامت سازه، سدهای بتنی، روش‌های غیرمخرب، تحلیل مودال، سنسورهای هوشمند، سد باغان جم

استناد: امامزاده، س. ش. و حیدری، م. (۱۴۰۳). پایش سلامت سازه‌های سدهای بتنی با استفاده از روش‌های نوین (مطالعه موردی سد باغان

جم). راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی، ۲(۴): ۳۱۵-۳۲۷. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2024.1122688>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

پایش سلامتی سازه به فرآیند اجرای یک استراتژی تشخیص آسیب برای زیرساخت‌های مهندسی عمران، مکانیک و هوافضا اطلاق می‌گردد. در دهه‌های اخیر پژوهش‌های مختلفی به منظور بهبود، ابداع روش‌ها و ابزارهای جدید پایش سلامتی سازه صورت پذیرفته است و کشورهای توسعه‌یافته سالانه بودجه‌های کلانی را برای تجهیز زیرساخت‌های مهم شهری خود به ابزارهای پایش سلامت سازه در نظر می‌گیرند. دیدگاه آن‌ها چنین است که استفاده از این ابزارها منجر به پیش‌آگاهی از بروز آسیب، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و کاهش تلفات انسانی شود. روش‌های مختلفی جهت شناسایی، موقعیت‌یابی و توصیف آسیب‌های سازه‌ای وجود دارند. روش‌های پایش سازه به طور مشخص از دو تئوری در زمینه‌ی پردازش سیگنال و دینامیک سازه بهره می‌گیرند که در این میان پردازش سیگنال نقش مهمی را ایفا می‌کند (Balageas et al., 2010). پایش سلامت سازه‌ها براساس دو رویکرد تشخیص و پیش‌بینی استوار است. بخش مهم و قابل پیشرفت در این حوزه همان پیش‌بینی است؛ زیرا رویکرد تشخیص، عمدتاً به همان روش‌های ارزیابی غیرمخرب می‌پردازد. معمولاً ابزارهای متنوعی به منظور پایش وضعیت سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به حسگرهای پیزوالکتریک، حسگرهای فیبر نوری و استفاده از مواد هوشمند اشاره کرد. تاکنون تحقیقات فراوانی در این زمینه صورت گرفته است به عنوان مثال: (Hill et al., 1987) در مورد میزان تأثیر بکارگیری سیستم پایش در پیشگیری و پیش‌آگاهی مخاطرات آتی و هزینه‌های محتمل تعمیر و نگهداری آینده و کاهش تلفات جانی و مالی احتمالی بحث کرد.

(Doebbling et al., 1996) از تغییرات مشخصات ارتعاشی سیستم‌های مکانیکی و سازه‌ای برای تشخیص خرابی استفاده نمود. (Raufi & Bahar, 2010) از روش هیلبرت- هوانگ برای تشخیص آسیب‌های لحظه‌ای یک قاب خمشی سه طبقه استفاده نمود. وی نشان داد که دوران گره‌های قاب بهترین گزینه برای تجزیه و تحلیل تشخیص آسیب هستند. (Zarafshan & Ansari, 2013) برای مدل‌سازی یک پل از نرم‌افزار اجزای محدود انسیس استفاده کردند. سنسورهایی بر روی بال زیرین تیر نصب شده بود. ایشان سناریوهای مختلفی را مورد ارزیابی قرار دادند. تعداد سناریوهای مورد مطالعه پنج نوع پل بود که طول عرشه آن‌ها از ۹/۳ متر تا ۲۱/۹۴ متر متغیر بود. درصد امواج ورودی جهت تحلیل برای همه فرآیندها ۱۰ درصد در نظر گرفته شد. با مقایسه نتایج مطالعه تئوری و آزمایشگاهی ایشان می‌توان بیان نمود که تبدیل هیلبرت روش مناسب با پاسخ‌های بهینه برای تعیین خسارت سازه است.

(Robbe et al., 2017) مطالعه تطبیقی بین تحلیل المان محدود و داده‌های لرزه‌نگاری واقعی از سدهای بتنی را ارائه دادند. نتایج نشان داد که مدل‌سازی دقیق اندرکنش سد- پی- مخزن می‌تواند خطای پیش‌بینی پاسخ دینامیکی را تا ۲۵٪ کاهش دهد. (Oliveira & Alegre, 2019) سیستم‌های پایش سلامت سدهای پرتغال را در کتابی با موضوع پایش لرزه‌ای سازه‌ها بررسی کردند. آنها بر اهمیت ادغام داده‌های لرزه‌نگاری با پارامترهای ساختاری برای تشخیص آسیب تأکید نمودند. این مطالعه پایه‌ای برای توسعه سیستم‌های پایش پیشرفته در سدهای اروپایی شد.

(Oliveira et al., 2022) نوآوری‌های نظری و محاسباتی در پایش سدهای بزرگ ارائه دادند. سیستم پیشنهادی آنها ترکیبی از حسگرهای لرزه‌ای و ساختاری بود که کاهش ۳۰٪ در هزینه‌های نگهداری را محقق می‌ساخت. (Ma et al., 2023) مدیریت ایمنی سدها با استفاده از سیستم‌های پایش هوشمند را بررسی کردند. پژوهش آنها نشان داد که ادغام داده‌های حسگرها با مدل‌های دیجیتال می‌تواند دقت پیش‌بینی خطر را تا ۴۰٪ افزایش دهد.

در اکثر پژوهش‌ها روش ارائه شده مبتنی بر پاسخ آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی سازه واقعی است که بر اساس پاسخ اندازه‌گیری شده، می‌توان تشخیص خرابی را با اطمینان قابل قبولی انجام داد. در این روش، برای اجرای پایش نیاز به اطلاعات کاملی از سازه نیست و با اطلاعات محدودی، می‌توان تشخیص خرابی را انجام داد (Huang et al., 2003).

یکی از دارایی‌های مهم در شبکه‌های آبرسانی، سدها هستند که حفاظت از آن‌ها از اولویت بالایی نسبت به سایر اجزای شبکه برخوردار است (Sheykhalil et al., 2020). امروزه مدیریت و کنترل ایمنی سدهای بزرگ به طور کلی مبتنی بر پایش خودکار سلامت لرزه‌ای و سازه‌ای (SSHM¹) با استفاده از آخرین فناوری اندازه‌گیری، جمع‌آوری و انتقال خودکار داده‌ها است (Oliveira & Alegre, 2020). نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که یک سد بتنی در طول عمر خود تحت بارگذاری‌های زیادی مانند زلزله، طوفان، سیل، انفجار قرار می‌گیرد (Emamzadeh, 2022)، لذا وجود یک سیستم نظارت ممتد برای ارزیابی عملکرد سازه‌ی سد و تخمین عمر مفید باقیمانده، ضروری به نظر می‌رسد. وجود چنین سیستمی در سدها به‌ویژه در سدهای مهم، منجر به کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری معمول و اطمینان از عملکرد مناسب سازه سد در حوادث حادی مانند زلزله و همچنین کاهش تلفات انسانی خواهد شد. مطالعات جدید نشان‌دهنده حرکت به سمت سیستم‌های هوشمند و خودکار پایش سلامت سازه‌ها هستند که از هوش مصنوعی، فناوری‌های بی‌سیم و پردازش پیشرفته سیگنال برای دستیابی به دقت و قابلیت اطمینان بالاتر در ارزیابی آسیب‌های سازه‌ای استفاده می‌کنند. هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی روش‌های پایش سلامت سدهای بتنی است. در این مطالعه پس از روش اجزای محدود و تحلیل تنش، سامانه پایش برای یک سد بتنی به عنوان نمونه طراحی گردید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی شیوه‌های تشخیص آسیب

روش‌های تشخیص آسیب را می‌توان به دو نوع موضعی و جامع تقسیم کرد. در روش‌های تشخیص آسیب موضعی مکان تقریبی آسیب شناسایی شده و سازه به صورت موضعی تحلیل می‌شود. برخلاف روش‌های موضعی، روش‌های جامع نیازی به دانستن حدود آسیب ندارند. این روش‌ها با پایدن تغییرات در خصوصیات لرزه‌ای سازه به تشخیص آسیب و شدت آن می‌پردازند. تغییر در مشخصات دینامیکی سازه می‌تواند ناشی از وقوع آسیب باشد؛ چرا که این مشخصات تابعی از خصوصیات فیزیکی سازه مثل جرم میرایی و سختی هستند (Sohn et al., 2003). روش‌های گوناگونی برای تشخیص آسیب بر پایه اندازه‌گیری مشخصات دینامیکی سازه به وجود آمده است. این روش‌ها را می‌توان بر پایه نوع داده‌ای که از سازه جمع‌آوری می‌شود و یا پارامتری که اندازه‌گیری می‌شود و یا روشی که به آن تشخیص صورت می‌گیرد، طبقه‌بندی کرد. به عنوان مثال می‌توان به روش‌های پایش تغییرات در پارامترهای مودال، روش بروزرسانی ماتریس، روش‌های بر پایه‌ی شبکه‌های عصبی، روش‌های تشخیص الگو بر پایه فیلتر کالمان، روش آماری و روش پردازش سیگنال اشاره نمود. جدول (۱) خلاصه‌ای از روش‌های تشخیص آسیب در سازه‌ها را نشان می‌دهد.

¹ Seismic and Structural Health Monitoring

۲-۱-۱- روش‌های مبتنی بر تحلیل مودال

پارامترهای مودال در یک سازه شامل فرکانس‌های طبیعی، شکل مود و نسبت میرایی هستند. چون پارامترهای مودال نسبت به تغییرات در سازه حساس هستند، می‌توان آنالیز مودال را یکی از روش‌های مبتنی بر ارتعاشات برای پایش سلامت سازه در نظر گرفت. از روش‌های به دست آوردن پارامترهای مودال مانند فرکانس‌های طبیعی، پاسخ فرکانسی و برای یک سازه پیچیده می‌توان از روش آنالیز مودال بهره گرفت. مشکلات استفاده از روش‌های عددی مانند روش رانگ‌کوتا این است که این روش پاسخ ارتعاشی سامانه را به صورت عددی حل می‌کند و جواب معادله به صورت کلی به دست می‌آید و اگر هرکدام از پارامترهای معادله تغییر کند، باید معادلات از ابتدا حل شوند. روش آنالیز مودال تا حدی این مشکل را برطرف کرده است. در آنالیز مودال، از معادلات ارتعاشی با اعمال تغییراتی، یک دستگاه معادله دیفرانسیل قطری بدست می‌آید که مقادیر ویژه این دستگاه، همان فرکانس‌های طبیعی هستند. از مقایسه فرکانس‌های حاصل با فرکانس‌های طبیعی سازه سالم می‌توان عمر سازه را تشخیص داد (Quek et al., 2003).

۲-۱-۲- روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی

در سال‌های اخیر علاقه فزاینده‌ای به استفاده از شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی میزان و مکان آسیب در ساختارهای پیچیده وجود داشته است. به دلیل ظرفیت بالای شبکه‌های عصبی در تشخیص دقیق الگوها، توانایی یادگیری و مدل‌سازی غیرخطی می‌توان از این روش برای پایش سلامتی سدها به صورت گوناگون بهره برد (Doebeling et al., 1996).

۲-۱-۳- روش‌های مبتنی بر تشخیص الگو

وجود آسیب در سازه موجب تغییر مشخصات مودال شده که خود موجب تغییر در الگوی پاسخ سازه می‌شود. با بررسی این الگو می‌توان به زمان، مکان و شدت آسیب پی برد. (Hou et al., 2004) موفق به تشخیص آسیب در سازه و پایش اغتشاشات در پاسخ دینامیکی شدند. هدف این روش این بود که نشان داده شود وقوع آسیب، موجب وقوع نقطه تکیه در پاسخ سازه می‌شود و آن را می‌توان در تبدیل ویولت پاسخ مشاهده نمود (Quek et al., 2003). روش دیگری در آزمایشگاه ملی لوس آلاموس آمریکا بر پایه روش‌های آماری نیز پیشنهاد شده است. این روش شامل چهارچوب آماری تشخیص الگو است که از ارزیابی سازه و به دست آوردن پاسخ سازه و تشخیص پارامترهای حساس به آسیب تشکیل یافته است.

۲-۱-۴- روش‌های مبتنی بر فیلتر کالمان

روش فیلتر کالمان بر پایه مدل استوار است و از یک الگوریتم بهینه تحلیل داده بازگشتی جهت تخمین پارامترهای لازم برای تشخیص آسیب استفاده می‌کند. متغیرهای مورد نیاز برای تشخیص آسیب همچون جرم و سختی و میرایی را نمی‌توان به صورت مستقیم اندازه‌گیری کرد و بنابراین پاسخ تغییر مکان، سرعت و یا شتاب سازه در عمل اندازه‌گیری می‌شوند. روش کالمان به صورت معادله حرکت، مقادیر پارامتری سازه را به پاسخ اندازه‌گیری شده مربوط می‌کند. این روش مقادیر پارامترهای سازه را با استفاده از مدل دینامیکی و اندازه‌گیری گذشته تخمین زده و آنگاه این مقادیر را ضمن مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده واقعی بهینه می‌کند.

۲-۱-۵- روش آماری

این روش برپایه روش بیزین پایه‌گذاری شده است. برتری مهم این روش در حالت‌هایی آشکار می‌شود که مقادیر ناکافی اندازه‌گیری وجود دارد. جهت حل مشکل عدم اطمینان‌ها، (Katafygiotis & Beck, 1995) یک چهارچوب آماری بر این اساس جهت تشخیص و پایش سلامتی سازه‌ها تعریف کرده‌اند. این روش آماری جهت حل مسائل مربوطه به عدم اطمینان‌های ناشی از نتایج ناکافی آزمایش، مشکلات مدل‌سازی، عدم حساسیت‌های پارامترهای مدال به تغییرات سختی و داده‌های ناکافی به علت کمبود حسگر و داده همراه با نویز توسعه یافت (Ismail et al., 2011).

۲-۱-۶- روش تحلیل سیگنال

از پاسخی که با استفاده از حسگرهای نصب شده روی سازه بدست آمده است، نمی‌توان مستقیماً جهت تشخیص آسیب استفاده نمود و نیاز است که این پاسخ مورد تحلیل و بررسی بیشتر قرار گیرد؛ لذا معمولاً سیگنال به حوزه دیگری تبدیل می‌شود تا خصوصیات آن آشکارتر شود. روش‌های مشهور در این کار تبدیل فوری، تبدیل ویولت و تبدیل هیلبرت هوانگ است (جدول ۲). این روش‌ها به‌طور گسترده در پایش سلامت سازه‌ها (SHM) برای استخراج ویژگی‌های آسیب از داده‌های حسگرها استفاده می‌شوند. انتخاب روش بستگی به نوع سازه، ماهیت آسیب، و دقت مورد نیاز دارد.

۲-۲- طراحی سامانه پایش سد باغان جم

سد باغان جم در ۱۲ کیلومتری غرب شهر انارستان در شهرستان جم استان بوشهر واقع شده است. این سد از نوع بتن غلطکی RCC بوده و ارتفاع سد از بستر ۵۴ متر- طول تاج ۳۱۱ متر- عرض تاج ۷/۵ متر است. برای بررسی اثر ساختگاه سه مدل ساخته شده است. در مدل اول خاک زیر سد همگن است و بصورت تک لایه در نظر گرفته می‌شود. در مدل دوم خاک زیر سد دو لایه بوده و لایه رویی سخت‌تر از لایه زیرین است. در مدل سوم سه لایه در نظر گرفته شده است که لایه‌های زیرین مقاومت بیشتری نسبت به لایه‌های رویی دارند. برای حل معادلات اندرکنشی به روش اجزای محدود، سیستم سد-پی-مخزن با اجزای چهارضلعی چهار گرهی کرنش صفحه‌ای گسسته‌سازی شده‌اند (شکل ۱ و ۲). عمق پی حدود سه برابر ارتفاع سد و برابر ۱۵۰ متر، مرزهای بینهایت در خاک نیز در فاصله حدوداً سه برابر ارتفاع سد و برابر ۱۵۰ متر از پنجه و پاشنه سد در نظر گرفته شدند. بتن مصرفی در سد باغان دارای چگالی ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و مدول الاستیسیته ۳۱ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۲ در نظر گرفته شد. چگالی خاک بستر سد ۱۶۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب، مدول الاستیسیته آن ۱ گیگاپاسکال و ضریب پواسون آن ۰/۳ فرض شد و از مدل خرابی پلاستیک استفاده گردید.

سه رکورد مولفه مختلف با PGAهای متفاوت برای ارزیابی موقعیت سنسورها در نظر گرفته شد. این سه رکورد را می‌توان مربوط به سه سطح خطر دانست بطوریکه $PGA > 0.7$ خطر زیاد، $0.4 < PGA < 0.7$ خطر متوسط و $PGA < 0.4$ خطر کم در نظر گرفته شد. برای این منظور سه رکورد ثبت شده در ایستگاه بم ۲۰۰۳ و زلزله کویتا ۱۹۷۶ و زلزله السترو، برای ساختگاه سد باغان مطابق شکل (۳) در نظر گرفته شدند. اطلاعات این رکوردها از سایت مرکز مطالعات مهندسی زلزله (PEER) استخراج و در نرم‌افزار آباکوس وارد شد. در خصوص انتخاب رکوردها نیز نکاتی مثل مشهور بودن رکورد، استفاده از آن‌ها در مطالعات قبلی، داشتن شدت قابل توجه و ... مد نظر بوده است.

جدول ۱- خلاصه‌ای از روش‌های تشخیص آسیب در سازه‌ها

Table 1. Summary of damage detection methods in structures

روش تشخیص آسیب	مبنای روش	مزایا	معایب/محدودیت‌ها
روش‌های مبتنی بر تحلیل مودال	تغییر در فرکانس‌های طبیعی، شکل مود و نسبت میرایی	عدم نیاز به مدل دقیق اولیه، قابلیت تشخیص تغییرات کلی در سازه	حساسیت کم به آسیب‌های موضعی، تأثیرپذیری از شرایط محیطی و نویز
روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی	یادگیری الگوهای غیرخطی و ارتباط بین پاسخ سازه و آسیب	توانایی مدل‌سازی پیچیده، تشخیص دقیق الگوهای آسیب	نیاز به داده‌های آموزشی زیاد، پیچیدگی محاسباتی
روش‌های مبتنی بر تشخیص الگو	شناسایی تغییرات در الگوی پاسخ سازه (مانند نقاط تکین در تبدیل ویولت)	تشخیص همزمان زمان، مکان و شدت آسیب	وابستگی به دقت حسگرها، حساسیت به نویز
روش‌های مبتنی بر فیلتر کالمان	تخمین بهینه پارامترهای سازه (جرم، سختی، میرایی) با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده	قابلیت به‌روزرسانی آنلاین پارامترها، مناسب برای سیستم‌های دینامیکی	نیاز به مدل دقیق اولیه، پیچیدگی در پیاده‌سازی برای سازه‌های بزرگ
روش‌های آماری (بیزین)	تحلیل عدم قطعیت‌ها در داده‌های ناکافی یا پرنویز	انعطاف‌پذیری در شرایط عدم قطعیت، ترکیب اطلاعات پیشین و پسین	نیاز به محاسبات پیچیده، وابستگی به مدل آماری انتخابی
روش‌های تحلیل سیگنال	تبدیل سیگنال‌های پاسخ سازه (تبدیل فوریه، ویولت، هیلبرت- هوآنگ)	آشکارسازی ویژگی‌های پنهان آسیب در سیگنال‌ها	وابستگی به نوع تبدیل مورد استفاده، حساسیت به نویز و تعداد حسگرها

جدول ۲- خلاصه‌ای از روش‌های تحلیل سیگنال

Table 2. Summary of signal analysis methods

روش	حوزه تحلیل	نقاط قوت	نقاط ضعف
تبدیل فوریه	فقط فرکانس	ساده و سریع	از دست دادن اطلاعات زمانی
تبدیل ویولت	زمان-فرکانس	تشخیص آسیب‌های موضعی	انتخاب تابع ویولت مناسب چالش‌برانگیز
هیلبرت- هوآنگ	زمان-فرکانس- میرایی	مناسب برای سیستم‌های غیرخطی	پیچیدگی محاسباتی

شکل ۱- نمودار تنش کرنش فشاری بتن

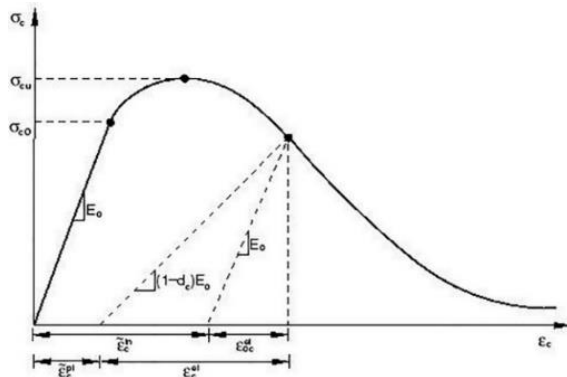


Fig 1. Concrete compressive stress-strain diagram

شکل ۲- نمودار تنش کششی و کرنش بتن

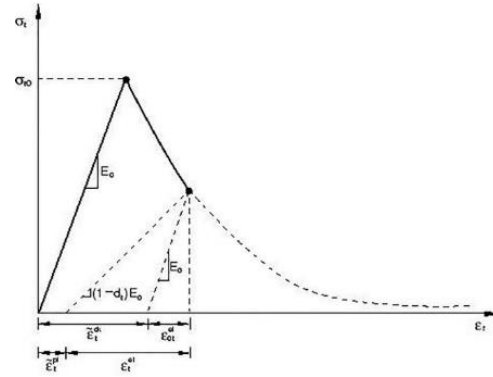


Fig 2. Concrete tensile stress and strain diagram

شکل ۳- نمودار شتاب زلزله (مولفه طولی)

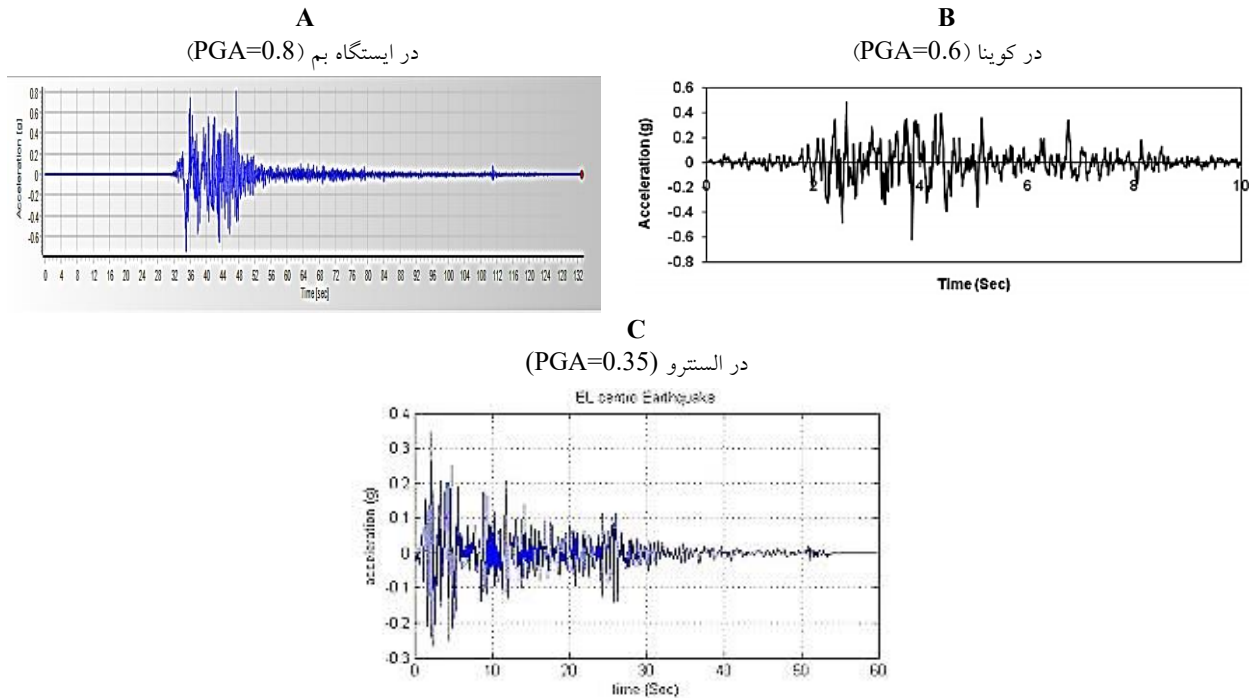


Fig 3. Earthquake acceleration diagram (longitudinal component). A: at Bam station (PGA=0.8); B at Koina (PGA=0.6); C: at Elcentro (PGA=0.35)

۳- نتایج و بحث

سه سطح خطر لرزه‌ای برای ساختگاه سد در نظر گرفته شده است. پس از تحلیل تنش، در مناطقی که تنش فون مایسز بیش از ۱/۵ مگاپاسکال باشد، سنسور قرار داده می‌شود. همچنین برای جابجایی بیش از ۱ سانتی‌متر نیز سنسور کرنش سنج قرار داده می‌شود.

۳-۱- مدل اول (زلزله بم) - سطح خطر زیاد

در این مدل، طبق شکل (۴) پوش کانتور تنش فون مایسز و جابجایی بدنه سد ترسیم گردید و با توجه به نقاط حساس که احتمال ترک خوردگی وجود دارد و در جاهایی که تنش کششی بالاتر از $1/5 \text{ MPa}$ بود نصب ۸ کرنش سنج به علت احتمال ترک خوردگی پیشنهاد شد. همچنین در نقاطی که جابجایی مخالف صفر بود نصب ۱۰ کرنش سنج نیز پیشنهاد گردید که در مجموع ۱۸ کرنش سنج پیشنهاد گردید.

شکل ۴- موقعیت سنسورها

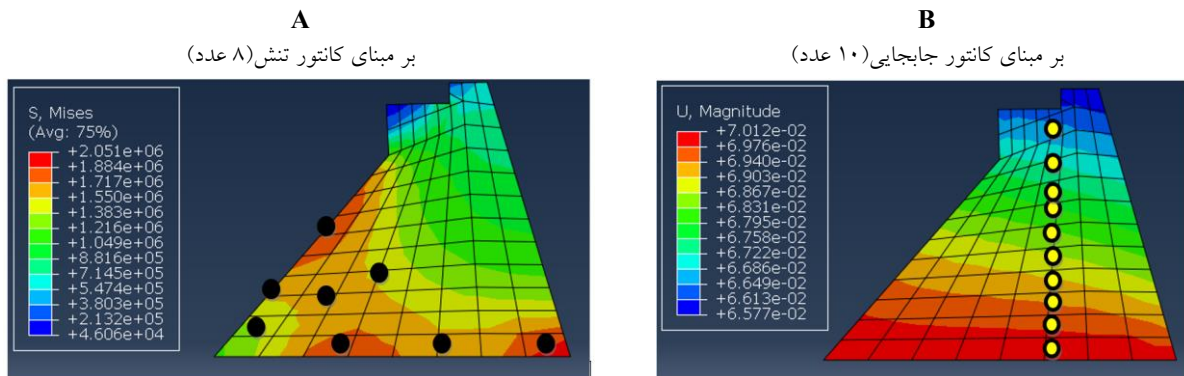


Fig 4. Sensor positions based on the stress contour (A); based on displacement contour (B)

۳-۲- مدل دوم (زلزله کوبنا) - سطح خطر متوسط

در این مدل طبق شکل (۵) پوش کانتور تنش فون مایسز و جابجایی بدنه سد ترسیم گردید و با توجه به نقاط حساس که احتمال ترک خوردگی وجود دارد و در جاهایی که تنش کششی بالاتر از $1/5 \text{ MPa}$ بود نصب ۶ کرنش سنج به علت احتمال ترک خوردگی پیشنهاد شد. همچنین در نقاطی که جابجایی مخالف صفر بود نصب ۸ کرنش سنج نیز پیشنهاد گردید که در مجموع ۱۴ کرنش سنج پیشنهاد گردید.

شکل ۵- موقعیت سنسورها

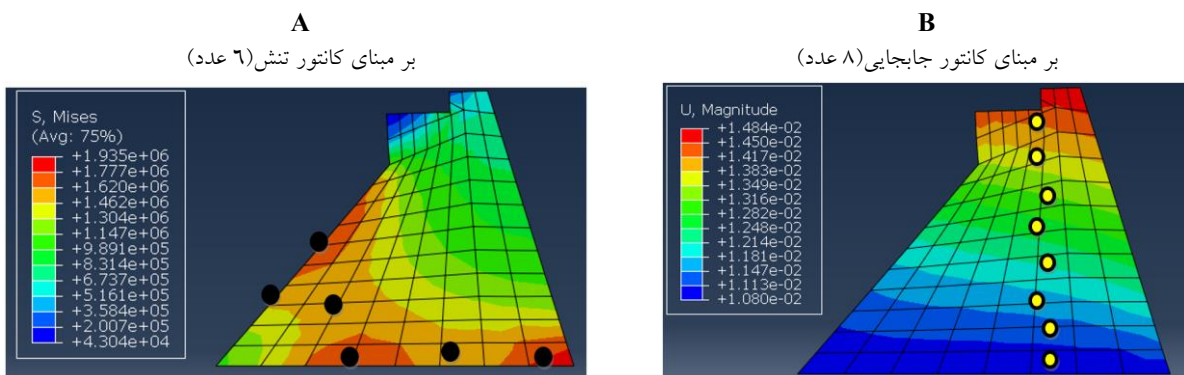


Fig 5. Sensor position based on the stress contour (A); based on displacement contour (B)

۳-۳- مدل سوم (زلزله السترو)

در این مدل طبق شکل (۶) پوش کانتور تنش فون مایسز و جابجایی بدنه سد ترسیم گردید و با توجه به نقاط حساس که احتمال ترک خوردگی وجود دارد و تنش کششی بالاتر از $1/5 \text{ MPa}$ بود نصب چهار کرنش‌سنج پیشنهاد شد. همچنین در نقاطی که جابجایی مخالف صفر بود نصب پنج کرنش‌سنج نیز پیشنهاد گردید که در مجموع ۹ کرنش‌سنج پیشنهاد گردید.

شکل ۶- موقعیت سنسورها

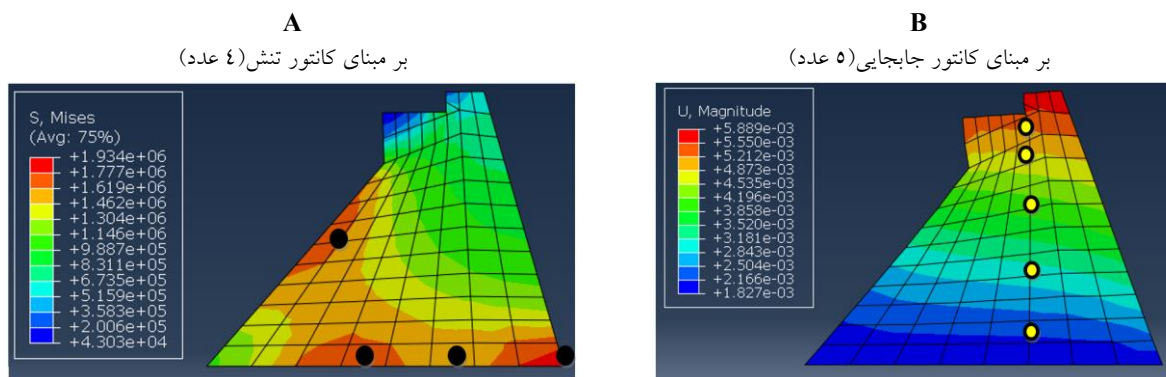


Fig 6. Sensor position based on the stress contour (A); based on displacement contour (B)

با توجه به اختلاف نتایج بین رکوردهای زلزله بر سدهای بتنی انجام یک تحلیل دینامیکی ضروری بود. در این تحقیق اثر رکورد پیرامون بدنه سد بررسی شد و مشاهده گردید که با افزایش حداکثر شتاب دینامیکی یعنی شتاب ماکزیمم رکورد و جابجایی نقاط مختلف آن افزایش می‌یابد و تعداد سنسورهای مورد نیاز نیز برحسب سطح خطر تغییر می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

هدف از این پژوهش آشنا نمودن جامعه مهندسين کشور با برخی از روش‌های مختلف پایش سلامتی سازه‌ها به ویژه سدها بوده است. در این تحقیق پس از معرفی روش‌های پایش، از روش اجزای محدود برای پایش سلامت یک سد بتنی استفاده شد. با توجه به نتایج مطالعه حاضر موارد زیر در طراحی سیستم پایش سدهای بتنی پیشنهاد می‌گردد:

ابتدا یک تحلیل تنش تحت اثر بارهای لرزه‌ای انجام شود و در نقاط بحرانی سنسورهای جابجایی‌سنج قرار داده شود.

یک معیار تنش برای قرار دادن سنسورها تعریف شود. برای مثال در این مطالعه اگر تنش کششی بیش از $1/5$ مگاپاسکال باشد قرار دادن یک سنسور به دلیل احتمال وقوع ترک پیشنهاد می‌گردد.

طبق نتایج این تحقیق برحسب سطح خطر حداقل ۴ و حداکثر ۱۴ سنسور جابجایی‌سنج در کل بدنه سد بتنی پیشنهاد شد.

موقعیت سنسورها را می‌توان بر مبنای کانتورهای تنش و یا کانتور جابجایی در بدنه سد مشخص نمود و هر جایی که جابجایی مخالف صفر باشد و یا تنش‌ها از مقدار مجاز بتن فراتر رود، کرنش‌سنج پیشنهاد نمود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

مشارکت نویسندگان

سید شهاب امامزاده: نگارش، روش‌شناسی، تحقیق و جمع‌آوری داده‌ها، نرم‌افزار، تحلیل. **مصطفی حیدری**: راهنمایی و نظارت، ویرایش متن، تکمیل و جمع‌آوری داده‌ها.

منابع

- Balageas, D., Fritzen, C. P., & Güemes, A. (Eds.). (2010). Structural health monitoring (Vol. 90). John Wiley & Sons.
- Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B., & Shevitz, D. W. (1996). Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review. Technical Report No. LA-13070-MS. <https://doi.org/30.10.2172/249299>.
- Emamzadeh, S. (2022). Dynamics behavior investigation of concrete gravity dams by deep underwater explosion method. *Iranian Dam and Hydroelectric Powerplant*, 8 (31), 29-40.
- Hill, K. O., Fujii, Y., Johnson, D. C., & Kawasaki, B. S. (1978). Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. *Applied physics letters*, 32(10), 647-647.
- Hou, Z., Hera, A., & Noori, M. (2004). A stochastic model for localized disturbances and its applications. *Probabilistic engineering mechanics*, 19(3), 211-218.
- Huang, N. E., Wu, M. L. C., Long, S. R., Shen, S. S., Qu, W., Gloersen, P., & Fan, K. L. (2003). A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 459(2037), 2317-2345. <https://doi.org/10.1098/rspa.2003.1123>
- Ismail, Z., Ong, A. Z. C., & Rahman, A. G. A. (2011). Crack damage detection of reinforced concrete beams using local stiffness indicator. *Scientific Research and Essays*, 6(34), 6798-6803. <https://doi.org/10.5897/SRE11.040>
- Katafygiotis, L. S., & Beck, J. L. (1995). A very efficient moment calculation method for uncertain linear dynamic systems. *Probabilistic engineering mechanics*, 10(2), 117-128. [https://doi.org/10.1016/0266-8920\(95\)00005-](https://doi.org/10.1016/0266-8920(95)00005-)
- Ma, C., Xu, X., Yang, J., & Cheng, L. (2023). Safety monitoring and management of reservoir and dams. *Water*, 15(6), 1078. <https://doi.org/10.3390/w15061078>
- Oliveira, S., & Alegre, A. (2019). Seismic and structural health monitoring of dams in Portugal. *Seismic structural health monitoring: from theory to successful applications*, 87-113.
- Oliveira, S., & Alegre, A. (2020). Seismic and structural health monitoring of Cabril dam. Software development for informed management. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 10(5), 913-925. <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00425-0>
- Oliveira, S., Alegre, A., Carvalho, E., Mendes, P., & Proença, J. (2022). Seismic and structural health monitoring systems for large dams: theoretical, computational and practical innovations. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(9), 4483-4512. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01392-1>
- Quek, S. T., Tua, P. S., & Wang, Q. (2003). Detecting anomalies in beams and plate based on the Hilbert–Huang transform of real signals. *Smart materials and structures*, 12(3), 447. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/12/3/316>

- Raufi, F., & Bahar, O. (2010). Damage Detection in 3-Story Moment Frame Building by Wavelet Analysis. In 14th European conference on Earthquake Eng. Ohrid, Macedonia.
- Robbe, E., Kashiwayanagi, M., & Yamane, Y. (2017). Seismic analyses of concrete dam, comparison between finite-element analyses and seismic records. In *16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile*.
- Sheykhali, M., Asadollahfardi, G., & Emamzadeh, S. S. (2020). Evaluation of the vulnerability of water supply facilities using the AHP and RAMCAP combined methods. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(5), 1205-1220. <https://doi.org/10.22060/ceej.2019.15289.5873>. (In Persian)
- Sohn, H., Farrar, C. R., Hemez, F. M., Shunk, D. D., Stinemates, D. W., Nadler, B. R., & Czarnecki, J. J. (2003). A review of structural health monitoring literature: 1996–2001. Los Alamos National Laboratory, USA, 1(16), 10-12989.
- Zarafshan, A., & Ansari, F. (2013, June). Damage index matrix: A novel damage identification method using Hilbert-Huang transformation. In *Topics in Modal Analysis, Volume 7: Proceedings of the 31st IMAC, A Conference on Structural Dynamics*, 2013 (pp. 439-450). New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6585-0_42