



شناسایی آسیب بر مبنای شناسایی سیستم سد بتنی دوقویی با استفاده از اجزای چسبنده ترک توسعه یافته و تبدیل موجک

سجاد پیربوداچی^۱، رضا تاری نژاد^{۲*}، محمد تقی اعلمی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

* البرز، صندوق پستی ۵۱۶۶۶۱۶۴۷۱ r_tarinezad@tabrizu.ac.ir

چکیده

هدف از تحقیق حاضر ارائه الگو و روندی کارآمد با استفاده از ترکیب روش المان محدود توسعه یافته بر مبنای مدل ترک چسبنده (اجزای چسبنده ترک توسعه یافته) و تبدیل موجک پیوسته برای پایش آنالیز سلامت سازه‌ای سد بتنی دوقویی می‌باشد. در این راستا مدل عددی دقیق سد سالم و آسیب‌دیده کارون ۳ به عنوان یکی از بلندترین سدهای بتنی دوقویی در حال بهره‌برداری کشوف، به ترتیب با استفاده از روش اجزاء محدود و اجزای چسبنده ترک توسعه یافته ساخته و تحت تحریک لرزه‌ای تحلیل می‌شود. مدل اجزای چسبنده ترک توسعه یافته برای مواد بتنی به عنوان مدلی قابل اطمینان برای ارزیابی پاسخ‌های واقعی سازه سد کارون ۳ در برابر بارهای وارده و آسیب‌های ایجاد شده می‌باشد که در آن کل سازه به عنوان ناجیه مستعد آسیب معرفی شده و ترک اولیه‌ای وجود ندارد. سپس برای تعیین اثرات ترک‌خوردگی و رفتار غیرخطی، با استفاده از شناسایی سیستم بر مبنای تبدیل موجک پیوسته، پارامترهای مواد سازه و تغییرات آن از روی پاسخ سازه برای بدست اوردن زمان شروع ترک‌خوردگی و نیز تشخیص محل آسیب بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد علی‌رغم مشکلاتی مانند اثر ورودی، تداخل موادی و تأثیرگذاری انتخاب نقطه مرتع برای اشکال مودی ناشی از نزدیکی فرکانس‌های طبیعی سیستم، روند پیشنهادی از قابلیت بالای برخوردار می‌باشد که تحلیل نتایج آن، سیر تغییرات فیزیکی بوجود آمده در سازه و زمان شروع ترک‌خوردگی از بررسی پنجه زمان-فرکانس و نیز تشخیص دقیق محل آسیب صورت گرفته از مقایسه شکل مودهای ارتعاشی طره مرکزی و پلان تاج سد را ممکن می‌سازد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۸ شهریور ۱۳۹۵

پذیرش: ۱۶ آبان ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۲۸ آذر ۱۳۹۵

کلید واژگان:

شناسایی آسیب

شناسایی سیستم

ترک چسبنده

روش المان محدود توسعه یافته

تبدیل موجک پیوسته

Damage Detection Based on System Identification of Concrete Arch Dam using XFEM Based Cohesive Crack Segments and Wavelet Transform

Sajjad Pirboudaghi, Reza Tarinezad*, Mohammad Taghi Alami

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

* P.O.B. 5166616471, Tabriz, Iran, r_tarinezad@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 29 August 2016

Accepted 06 November 2016

Available Online 18 December 2016

Keywords:

Damage detection

System identification

Cohesive crack

Extended finite element method

Continuous wavelet transform

ABSTRACT

The aim of this work is to propose a procedure for online structural health monitoring of a double curvature arch dam structure using combination of the extended finite element model (XFEM) based on cohesive crack model (XFEM based cohesive crack segments) and continuous Wavelet transform (CWT). In this way, the Karun 3 dam, one of Iranian under operation arch dam, is numerically modeled and analyzed using the finite element method (FEM) and XFEM based cohesive crack segments respectively, and the dam is analyzed under the seismic excitation. The XFEM based cohesive crack segments for concrete material as a reliable model is used for investigating real responses of Karun 3 concrete dam against applied loads and damages. In this model, whole of the structure is potentially under damage risk, while there is no initial crack. Then, for specification of crack effects and nonlinear behavior, the structural modal parameters and their variation should be investigated based on structure response for obtaining damage initiation time and its location by using system identification based on CWT. Results show the high ability of proposed procedure, in spite of difficulties arising from input effect, modal interference and choosing reference point effectiveness on modal shapes. By using analysis of the procedure results, the history of physical changes occurred in the structure and cracking initiation time from investigating time-frequency window of the structure response and exact location of crack from comparing the intact and damaged crest and central cantilever vibration modes are made possible.

خرابی^۱ در مقایسه‌ی دو وضعیت متفاوت از یک سیستم معنا خواهد داشت

-۱ مقدمه

Please cite this article using:

S. Pirboudaghi, R. Tarinezad, M. T. Alami, Damage Detection Based on System Identification of Concrete Arch Dam using XFEM Based Cohesive Crack Segments and Wavelet Transform, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 373-383, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

طی زلزله منجیل آسیب دیده بود، با استفاده از آزمایش میز لزه پرداختند. مدل ایشان 1/30 مدل واقعی بوده و با استفاده از نتایج آزمایش، برای دو حالت سالم و ترکخورده، ضربه اطمینان مدل سد را در شرایط کنونی بدست آوردند.

پن و همکاران کارایی روش‌های المان محدود توسعه‌یافته چسبنده، المان محدود با روابط خارجی پلاستیک و المان محدود با رابطه الاستوپلاستیک دراگر-پرایگر را برای ترکخورده لزه‌ای سدهای بتی بررسی کردند [13].

با این‌قوچک و شروع در سال 2012 اجزاء محدود توسعه‌یافته از مراتب بالاتر را با ترکیب المان محدود توسعه‌یافته استاندارد و المان محدود از مراتب بالاتر ارائه کردند. برآورده خطای استفاده از مش تطبیقی و صحبت‌سنگی 3 مثال عددی بررسی شده است [14].

باردواج و همکاران در سال 2013، مسائل ترک صفحه‌ای را با استفاده از روش المان ایزوژئومتریک توسعه‌یافته بررسی کردند. توابع شکل در این روش به جای توابع لاغرانژ را واقع توابع اسپیلاین بود. نتایج نشان می‌دهد ضرایب تمرکز تنفس بدست آمده از این روش دقیق‌ترین نسبت به روش المان محدود توسعه‌یافته دارد [15].

زانگ و همکاران در سال 2013 با اجرای روش المان محدود توسعه‌یافته توسط نرم‌افزار آباقوس، ترکخورده لزه‌ای سدهای بتی با ترک اوایله مثل سد کوینا را در حالت‌های مختلف ترک یکطرفه و دوطرفه بررسی کردند. نتایج تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد [16].

نصیرمنش و محمدی در سال 2015، تحلیل خطی مقادیر ویژه کمانش ورق‌های کامپوزیت تک لایه را در چارچوب روش المان محدود توسعه‌یافته بررسی کردند. المان پوسته 8 گرهی که تغییرشکل برشی را در نظر می‌گیرد، مورد استفاده قرار گرفته است. پارامترهای اثربازار بر فرatar کمانشی ورق مثل طول، زاویه ترک، جهت فیبر و شرایط مرزی برای بررسی کارایی روش المان محدود توسعه‌یافته تحت بارگذاری فشاری، کششی و برشی بررسی شده است [17].

ونگ و همکاران در سال 2016، روش المان محدود توسعه‌یافته تطبیقی جدیدی با استفاده از المان شش وجهی پارامتری برای مدلسازی سوراخ‌های کامپوزیت سه بعدی پیشنهاد کردند که قابلیت و دقیق‌ترین برای تحلیل مسئله دارد [18].

در سال 2016 تاریخ‌نژاد و داما دیپور با استفاده از مدل ساختمان سه طبقه و سد پاکویما به روش جدید ترکیب تبدیل موجک و تجزیه حوزه فرکانس⁶، موفق به شناسایی سیستم شده‌اند به طوریکه اثرات خطای ناشی از ناهمزمانی⁷ رکوردها حین زلزله بررسی شده است [19].

ترکیب روش المان محدود توسعه‌یافته بر مبنای مدل ترک چسبنده (اجزای چسبنده ترک توسعه‌یافته) و تبدیل موجک پیوسته بمنظور ارائه الگو و روندی کارآمد برای پایش سلامت سازه‌ای⁸ سد بتی دوقوی کارون 3 به عنوان یکی از سدهای بلند کشور در تحقیق حاضر پیشنهاد می‌شود. علی‌رغم استفاده از روش المان محدود توسعه‌یافته به طور گسترده در بسیاری از زمینه‌ها، تاکنون از روش المان محدود توسعه‌یافته در زمینه شناسایی سیستم و تشخیص آسیب بر مبنای آن استفاده نشده است. در روش‌های شناسایی آسیب، عیب از پیش تعیین شده‌ای (مثلاً المان با سختی صفر) در

که یک وضعیت به عنوان حالت بدون نقص وضعیت دیگر به عنوان حالت آسیب‌دیده و غیر سالم خواهد بود. از این‌رو، برای تشخیص اثرات آسیب در یک سازه بزرگ و پیچیده با استفاده از شناسایی سیستم، نیاز به مدلسازی دقیق عددی است تا نتایج بدست آمده از این مدل غیرخطی، با حالت بدون نقص مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرند. برای مدلسازی عددی سازه ترک خورده نیاز به روش‌های دقیقی است تا اثرات آن به صورت صحیح و بهینه اعمال شود. عبارت دیگر تهیه مدل عددی از سازه که بتواند رفتار آن را توجیه کند بسیار با اهمیت خواهد بود. روش‌های گوناگونی در این زمینه وجود دارد که محبوب‌ترین آنها المان محدود می‌باشد. اما مدلسازی ناپیوستگی‌ها و از جمله ترک همواره از مشکلات موجود در آن بوده است. بنابراین برای حل این مشکل بليتسکو و همکارانش (1994) روش «بدون المان»² را که در آن فقط گره در محیط مدل درنظر گرفته می‌شد، بنیانگذاری کردند [2,1]. استفاده از مفهوم «تفکیک پیوستگی»³ که ملتک و باپوسکا [3] و دات و اودن [4] در سال 1996 ارائه کردند چشم‌انداز جدیدی برای مدل کردن ترک وجود آورد و در سال 1999، مؤسی و همکارانش روشنی بر پایه المان محدود که نیاز به مشبندی مجدد نداشت را براساس مفهوم تفکیک پیوستگی بنیانگذاری کردند [5].

در سال 2000 داکس و همکارانش با تکمیل روش مؤسی، روشنی به نام المان محدود توسعه‌یافته⁴ را بنا نهادند [6]. برای اولین بار کاربرد روش المان محدود توسعه‌یافته در مدل کردن ترک‌های سه بعدی توسط سوکومار و همکارانش ارائه شد [7].

لطفی و همکاران در مطالعاتی [9,8] به بررسی ترکخورده لزه‌ای سدهای بتی با مدلسازی سدهای کوینا و سد بتی قوسی پرداخته‌اند. آنها از مدل خارجی - پلاستیک با مکانیزم‌های میرایی مختلف و همچنین ترکیب تکنیک ترک نفوذی غیرمتعمد و ترک گسسته استفاده کرده‌اند. تکنیک ترکیبی استفاده شده بوسیله برنامه نوشته شده بر روی سد کوینا کارایی خوبی داشته است [8]. نتایج نشان می‌دهد مدل میرایی وابسته به خارجی، ترکخورده‌گی بیشتری داشته و الگوی ترک را بهتر پیش‌بینی می‌کند. همچنین اضافه کردن اندرکنش به مدل باعث تفاوت بیشتری در نتایج مکانیزم‌های میرایی می‌شود [9].

باو و همکاران در سال 2009، تبدیل هیلبرت-هوآنگ بهبودیافته برای شناسایی آسیب سیستم‌های متغیر با زمان را ارائه کردند. آنها ابتدا کارایی روش را بر روی مثال‌های ساده تحلیلی مثل موج سینوسی، سیستم یک و چند درجه آزادی بررسی و صحبت‌سنگی کردند. سپس مدل یک تیر مختلط فولادی بتی که گل میخ‌های برشی به صورت ثابت و قابل حذف بودند، تحت بر ضربه آزمایش شد. روش ایشان کارایی خوبی برای شناسایی محل آسیب دارد [10].

چن و همکاران در سال 2009 کارایی ناحیه چسبنده⁵ بر مبنای روش المان محدود را برای مسائل شکست هیدرولیکی بررسی کردند. در واقع در مساله، فشار آب نیز در داخل ترک وجود دارد که باعث اعمال فشار به دیواره‌های ترک می‌شود. معادلات حاکم با استفاده از روابط اندرکنش سیال و جامد ارائه شده و مورد استفاده قرار گرفت [11].

در سال 2010 قائم مقامی و قائمیان [12] به مطالعه سد سفیدرود که

¹ Damage

² Element Free- Mesh Free

³ Partition of Unity

⁴ Extended finite element method

⁵ Cohesive zone

⁶ FDD-WT
⁷ Non -synchronous
⁸ Structural Health Monitoring (SHM)

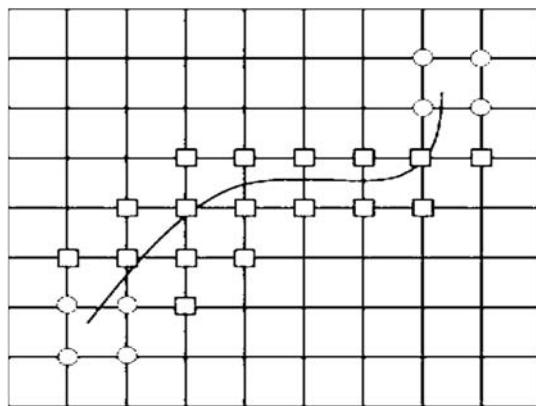


Fig. 1 The nodes enrichment representation in XFEM [20]

شکل ۱ نمایش غنی‌سازی گره‌ها در روش المان محدود توسعه‌یافته [20]

$$H = \begin{cases} +1 & \text{اگر } y > 0 \\ -1 & \text{اگر } y < 0 \end{cases} \quad (3)$$

برای استفاده ازتابع فوق محور افقی را به صورت محلی روی امتداد ترک قرار داده به گونه‌ای که جهت مثبت آن به سمت نوک ترک باشد در این شرایط نقاط بالای محور افقی ($y > 0$) دارای H برابر +1 و در غیر اینصورت ($y < 0$) برابر -1 می‌شود.

غنی‌سازی در گره‌های اطراف نوک ترک از طریق تابع تکینه انجام می‌شود تا بهترین تطبیق را با شرایط واقعی جابجایی‌های اطراف نوک ترک پیدا کند. عبارتی که ایجاد حالت تکینه در نقاط اطراف ترک می‌نماید $\sqrt{r} \sin^{\theta}$ می‌باشد که r, θ مختصات قطبی نقاط اطراف نوک ترک در دستگاه مختصات قطبی واقع در نوک ترک است. البته برای افزایش دقت جواب‌ها عبارات دیگری نیز به عبارت مربوط به تکینه‌سازی اضافه می‌شود که این عبارات از رابطه بین جابجایی‌های نقاط اطراف نوک ترک بر حسب موقعیت آن نقاط و «ضرایب شدت تنش»² در نوک ترک به دست می‌آیند که در نهایت تابع چهارجمله‌ای به صورت رابطه 4 برای غنی‌سازی گره‌های اطراف نوک ترک مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\phi_{\alpha}, \alpha = 1:4 = \left[\sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \right] \quad (4)$$

با توجه به دو نوع تابع غنی‌ساز مشخص شده، روابط (1) و (2) به صورت روابط (5) و (6) تبدیل می‌شوند:

$$u = \sum_{I=1}^N N_I \left[u_I + Ha_I + \sum_{\alpha=1}^4 \phi_{\alpha} d_{\alpha I} \right] \quad (5)$$

$$v = \sum_{I=1}^N N_I \left[v_I + Hc_I + \sum_{\alpha=1}^4 \phi_{\alpha} b_{\alpha I} \right] \quad (6)$$

در روابط فوق u_I و v_I جابجایی گره I ام به ترتیب در راستای x ، y مربوط به حل المان محدود استاندارد می‌باشد که همه گره‌ها را شامل می‌گردد. a_I و c_I ضرایب مجھول مرتبط به درجات آزادی افزایش یافته مرتبط با تابع غنی‌ساز پله‌ای واحد به ترتیب در جهات y ، x است که برای گره‌های اطراف المان‌های کاملاً بریده شده توسط ترک بدست می‌آید. $d_{\alpha I}$ و $b_{\alpha I}$ ضرایب مجھول نظیر افزایش درجات آزادی مرتبط با تابع غنی‌کننده تکین به ترتیب در جهات y ، x فقط برای گره‌های اطراف المانی که نوک ترک در آن واقع است، می‌باشد. بنابراین با روش المان محدود توسعه‌یافته، ترک به

سازه گنجانده شده و سپس به بررسی آن پرداخته می‌شود. ولی در روند پیشنهادی حاضر، کل سازه با استفاده از قابلیت روش المان محدود توسعه‌یافته مستعد آسیب بوده و هر ناحیه‌ای که به حد خرابی برسد، شروع به ترک خودگی کرده و داخل بدنه گسترش پیدا خواهد کرد. اگرچه ممکن است سازه اصلاً ترک نخورد. این قابلیت مزیت بزرگی است که در ترکیب با تبدیل موجک پیوسته برای پایش آنلاین سلامت سازه‌ای محاسبه می‌شود و هر لحظه با استفاده از آن می‌توان هرگونه تغییر در سیستم را شناسایی کرد. ضمن اینکه اثرات غیرخطی بودن سازه در نظر گرفته شده و الگوی ترک خودگی لرزه‌ای بدنه سد بدست می‌آید.

2- روش المان محدود توسعه‌یافته

روش المان محدود توسعه‌یافته یکی از روش‌های جدید مدلسازی مسائل مکانیک شکست است. این روش نسبت به روش‌های پیشین دارای مزیت‌های بسیاری است. مدل کردن ناپیوستگی‌ها مثل ترک با روش المان محدود عمولی نیازمند آن است که مش از هندسه ناپیوستگی تعییت کند. مدل کردن یک ترک در حال رشد پیچیده‌تر خواهد بود زیرا همانطور که ترک رشد می‌کند مش نیز باید بتواند خود را با هندسه جدید ترک در هر گام مطابقت دهد. در روش المان محدود توسعه‌یافته با استفاده از دسته‌ای از توابع غنی‌سازی که با توجه به هندسه و فیزیک مساله انتخاب می‌شوند، توابع شکل عادی المان محدود غنی‌سازی می‌شوند. در واقع تنها توابع خاصی بر مبنای نوع ناپیوستگی به حل عددی استاندارد اضافه می‌شوند. برای مدل کردن ترک، از یک تابع برای ایجاد ناپیوستگی در امتداد طول ترک و از تابع دیگری برای ایجاد شرایط تکینه در المان نوک ترک استفاده می‌گردد. در نتیجه اعمال توابع، درجه آزادی گره‌های اطراف المان نوک ترک و گره‌های اطراف طول ترک افزایش می‌یابد، که به آن غنی‌سازی گرهی مطابق روابط 1 و 2 گفته می‌شود:

$$u = \sum_{I=1}^N N_I \left(\sum_{j=1}^M \psi_j a_j \right) \quad (1)$$

$$v = \sum_{I=1}^N N_I \left(\sum_{j=1}^M \psi_j c_j \right) \quad (2)$$

در روابط 1 و 2، ψ و a جابجایی‌های گره به ترتیب در راستای y و x ، N_I تابع شکل در روش المان محدود استاندارد، $(J)\psi$ تابع غنی‌ساز و a_J و c_J ضرایب مجھول مرتبط با تابع غنی‌ساز به ترتیب در جهات y و x است که در نهایت توسط این روابط، ضرایب مجھول a_J و c_J به درجات آزادی گره‌های اطراف ترک اضافه می‌شوند. مطابق شکل 1، برای تعیین نوع تابع مناسب جهت غنی‌سازی، محل برخورد ترک با اضلاع المان‌ها مشخص می‌گردد. اگر ترک در دو ناحیه اضلاع یک المان را ببرد از تابع پله‌ای واحد جهت غنی‌سازی گره‌های اطراف آن المان استفاده خواهد شد (گره‌های مربعی) و اگر ترک تنها یکی از اضلاع المان را قطع کند یا به عبارت دیگر نوک ترک داخل المان باشد برای گره‌های اطراف آن المان غنی‌سازی به روش تابع تکینه انجام خواهد گردید (گره‌های دایره‌ای).

برای معرفی هندسه ترک در روش المان محدود توسعه‌یافته از روش تعیین سطح¹ استفاده می‌شود. در واقع این روش کمک می‌کند تا گره‌های که باید غنی‌سازی شوند، مشخص شود. برای غنی‌سازی از طریق تابع پله‌ای واحد از یک تابع دو مقداری H به صورت رابطه (3) استفاده می‌شود:

² Stress intensity factor¹ Level set method

(A-B) است. نقطه پیک نمودار (نقطه A) محل آغاز شکست می‌باشد که روابط زیادی برای تعیین آن ارائه شده است.

مکانیزم گسیختگی عبارت است از معیار جوانه‌زنی آسیب و قانون تکامل³ آن، یکی از روابط معیار جوانه‌زنی آسیب که مبنای مدل استفاده شده در تحقیق حاضر نیز می‌باشد، معیار شکست حداقل تنش اصلی⁴ مطابق با رابطه (7) است:

$$f = \left\{ \begin{array}{l} (\sigma_{\max}) \\ \sigma_0^0 \end{array} \right\} \quad (7)$$

در رابطه 7 σ_{\max}^0 به معنای بیشترین تنش اصلی مجاز ماده است. نماد $\langle \rangle$, به پرانتز مکالای⁵ معروف است. هنگامی که آرگومان اینتابع منفی شود، تابع مقدار صفر را بر می‌گرداند و برای مقادیر مشت آرگومان، تابع برابر با مقدار آرگومانش می‌شود. بنابراین تغییرشکل فشاری خالص و یا تنش فشاری نمی‌تواند منجر به ایجاد آسیب شود. آسیب هنگامی شروع می‌شود که نسبت تنش اصلی حداقل (رابطه 7) به مقدار یک برسد. ترک اضافه شده یا ترک اولیه هنگامی توسعه می‌یابد که پس از یک مرحله تعادل، معیار شکست با توجه به ترانس مدنظر⁶ در محدوده مشخص شده در رابطه (8) قرار بگیرد:

$$1.0 \leq f \leq 1.0 + f_{tol} \quad (8)$$

در این معیار هنگامی که تنش اصلی حداقل ارضا شد، ترک جدید همیشه متعامد با تنش اصلی حداقل اصلی تعریف می‌شود. پس از جوانه‌زنی ترک، رشد آن بر اساس ارتباط بین تنش چسبنده و باز شدن دهانه ترک محاسبه می‌شود. قانون تکامل آسیب در واقع سرعت کاهش سختی چسبنده‌گی را هنگام ارضا شدن معیار جوانه‌زنی نشان می‌دهد. چهارچوب اصلی قانون تکامل آسیب این معیار، همان قانون تکامل آسیب در سطوح چسبنده است. از اینرو مولفه‌های عمودی و برشی متاثر از آسیب بر اساس رابطه (9) تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} t_n &= \left\{ \begin{array}{ll} (1-D) \times T_n & , \quad T_n \geq 0 \\ T_n & , \quad T_n < 0 \end{array} \right. \\ t_s &= (1-D) \times T_s \\ t_t &= (1-D) \times T_t \end{aligned} \quad (9)$$

که در رابطه (9)، T مولفه‌های تنش پیش‌بینی شده با رفتار جداسازی الاستیک بردار تنش برای حالت بدون آسیب و t مولفه‌های متاثر از آسیب است. زینویس‌های n ، s و t به ترتیب بیانگر راستای عمودی و راستای برشی اول و دوم هستند. متغیر عددی D بیانگر مقدار آسیب است. مقدار اولیه متغیر D در ابتدا صفر است و به مرور با شروع و رشد آسیب مقدار آن از صفر به سمت یک پیش می‌رود. تا رسیدن به نقطه آغاز شکست، تغییرشکل ماده کاملاً الاستیک بوده که مقدار آن با توجه به تنش وارد، مدول یانگ و ضریب پواسون ماده قابل محاسبه است. بعد از ارضا شدن رابطه (7) و رسیدن به نقطه A ماده وارد فاز شکست شده و مقاومت خود را کم کم از دست خواهد داد [25]. برای تعیین معیار آسیب تنش حداقل اصلی، با استفاده از آزمایش انجام شده بر روی نمونه برای تعیین مقاومت کششی، این عدد به عنوان تنش اصلی حداقل مجاز برای مدل در نظر گرفته شده است.

4- تبدیل موجک پیوسته

منظور از توزیع زمان- فرکانس⁶، تکنیک‌ها و اصولی است که در تحلیل

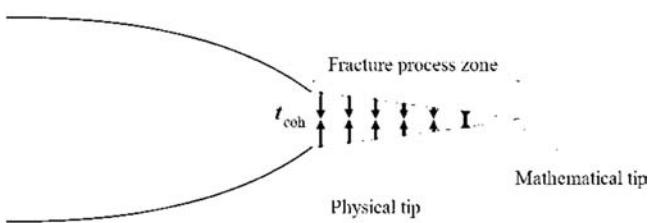
صورت مجازی و مستقل از مش مدل می‌شود و نیاز به استفاده از مش ریز، المان تکینه در اطراف نوک ترک و ایجاد مش مجدد در بررسی رشد ترک نخواهد بود [21].

3- مدل ترک چسبنده¹

در حالتی که ناحیه فرآیند شکست در مقایسه با طول ترک و ابعاد مسئله قابل صرفنظر کردن نباشد، مثل مصالح نیمه ترد نظریه مصالح خاکی و بت، استفاده از مدل مکانیک شکست الاستیک خطی منطقی نیست. بمنظور توصیف فرآیندهای غیرخطی که در محدوده نوک ترک رخ می‌دهد، باربلاط در سال 1962 [22] و داکنیل در سال 1960 [23] مدل ترک چسبنده را به عنوان جایگزینی برای مدل مکانیک شکست خطی مطرح نمودند. مدل ترک چسبنده، رفتار غیرخطی در ناحیه نوک ترک را به حساب آورده و تکینگی میدان تنش در نوک ترک را که یک فرض غیر واقعی مکانیک شکست الاستیک خطی می‌باشد اصلاح می‌کند. مطابق شکل 2، نوک ترک در مدل ترک چسبنده به دو صورت تعریف می‌شود: یکی نوک ترک ریاضی که محلی است که در آن ناپیوستگی میدان جابجایی در مدل المان محدود توسعه‌یافته از بین می‌رود و دیگری نوک ترک واقعی که محلی است که در آن نیروی چسبنده در نوک ترک از بین می‌رود.

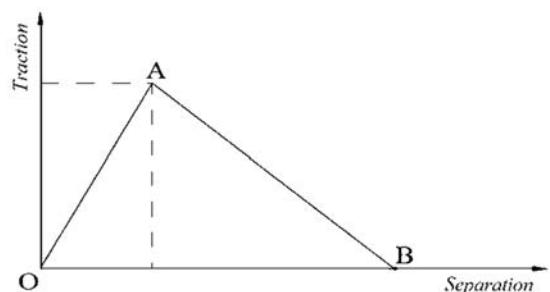
4- معیار کشش جداش²

برای بررسی و مدلسازی رفتار مکانیکی مواد تحت اعمال تنش‌های مختلف، معیارهای شکستی منطبق با خصوصیات آنها ارائه می‌شود. معیار کشش جداش بر مبنای مفهوم ترک چسبنده که در آن رفتار ماده تحت اعمال کشش و برش، به دو بخش قبل از جوانه زنی و آغاز شکست کامل ماده تقسیم می‌شود، هموارانی خوبی با رفتار مواد شبه ترد از جمله سنگ‌ها و مواد مصنوعی مانند بتن از خود نشان می‌دهد. در شکل 3، نمای کلی این معیار شکست نشان داده شده است که قابل تقسیم به دو بخش تغییرشکل الاستیک قبل از جوانه‌زنی ترک (O-A) و ایجاد و توسعه ترک در ماده



شکل 2 نوک ترک در مدل ترک چسبنده [24]

[24]



شکل 3 نمودار شماتیکی از معیار کشش - جداش [25]
[25]

¹ Cohesive crack model
² Traction separation laws

³ Damage evolution law

⁴ Maximum principal stress (MaxPS)

⁵ Macaulay bracket

⁶ Time-Frequency distribution

$$W_{a,b} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (12)$$

همان‌طور که اشاره شد، در معادلات (11) و (12)، ضریب b پارامتر انتقال و ضریب a پارامتر مقیاس نامیده می‌شود. ضریب $1/\sqrt{a}$ نیز جهت نرمایزه کردن انرژی بکار می‌رود. پارامتر انتقال b ، وظیفه انتقال تابع را در طول زمان بر عهده دارد؛ با بزرگ شدن a در رابطه بالا، موجک اصلی کشیده می‌شود و بخش بزرگی از سیگنال را پوشش می‌دهد که به تبع آن محتوای فرکانسی پایین را آشکار می‌سازد. با کاهش پارامتر a ، موجک اصلی منقبض شده و بخش کوچکی از سیگنال را پوشش می‌دهد. نحوه محاسبه تبدیل موجک سیگنال $(t)x$ چنین می‌باشد که پس از انتخاب موجک اصلی (مادر) سیگنال مورد نظر را بر روی $\psi_{a,b}$ تصویر کرده و تبدیل موجک آن با محاسبه انتگرال بدست می‌آید. این عمل به ازای تمامی مقادیر b و a برای بدست آوردن تبدیل موجک محاسبه می‌شود. مقدار انتگرال محاسبه شده در هر گام را با c نشان می‌دهند که نشان دهنده آن است که موجک مربوطه با این قسمت از سیگنال تا چه حدی همبسته می‌باشد. هر چه مقدار c بیشتر باشد، تشابه نیز بیشتر می‌گردد. در تحقیق حاضر موجک مولت اصلاح شده، به عنوان تابع موجک مادر انتخاب شده است. این تابع به صورت رابطه (13) تعریف می‌شود:

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{i2\pi f_c t} e^{-t^2/f_b} \quad (13)$$

که در آن f_b پارامتر پهنه‌ی باند و f_c پارامتر فرکانس مرکزی موجک است. پارامتر پهنه‌ی باند f_b شکل موجک اصلی را کنترل می‌کند؛ این قابلیت در موجک مولت سنتی یا رایج، وجود نداشت. تبدیل فوریه موجک مولت اصلاح شده اتساع یافته، به صورت رابطه (14) می‌باشد:

$$\psi(af) = e^{-f_b \pi^2 (af - f_c)^2} \quad (14)$$

با ماقریزم کردن تابع $\psi(af)$ می‌توان به رابطه $af = f_c$ دست یافت. این رابطه بیان‌گر اینست که فرکانس فوریه f_c به وسیله پارامترهای f_c و a تعیین شود. عدمه تفاوت موجک‌های مولت رایج و اصلاح شده، به پارامتر پهنه‌ی باند بر می‌گردد. در موجک مولت رایج، برای تجزیه و تحلیل تمامی سیگنال‌ها، از مقدار عددی $f_b = 2$ استفاده می‌شود و همین امر منجر به ایجاد رزولوشن پایین به خصوص در تحلیل سیگنال‌های باند پهنه می‌شود. بنابراین موجک مولت اصلاح شده، به دلیل برخورداری از مزیت پارامترهای قابل تنظیم f_c و f_b ، قادر به تجزیه هر نوع سیگنال (به ویژه سیگنال‌های باند پهنه) با رزولوشن و قدرت تفکیک پذیری بی‌نظیر می‌باشد. همچنین مودهای نزدیک به هم به طور کامل تفکیک و جدا می‌شوند و در اغلب موارد نواحی اثر انتهایی نیز به طور مؤثر و به قدر کفایت حذف می‌شوند [26].

5- مدلسازی عددی سد کارون 3

سد کارون 3 به عنوان یکی از بلندترین سدهای بتی دوقوسي در حال بهره‌برداری کشور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. عملکرد مطابق انتظار این سازه و اطمینان از این مستله، جایگاه ویژه‌ای در صنعت سدسازی کشور دارد. سد کارون 3 از نوع بتی دوقوسي با طول تاج 462 متر، عرض تاج 5.5 متر، ارتفاع از پی 205 متر و ضخامت در پی 29.5 متر می‌باشد. نمایی از بدنه سد، مخزن و سازه‌های جنبی در شکل 4 ارائه شده است.

برای تحلیل سد از پارامترهای قبلی بدست‌آمده که مبنای طراحی سد کارون 3 می‌باشند استفاده می‌شود. مدول الاستیسیته 29.5 گیگاپاسکال، ضریب پواسون 0.2، دانسیته بتن 2400 کیلوگرم بر مترمکعب و مقاومت

سیگنال استفاده می‌شود که از یک سو، محتوای زمانی - فضایی را در نظر می‌گیرد و از سوی دیگر محتوای طیفی، تا اینکه نتایج قوی‌تری را نسبت به حالتی که دو حوزه را جداگانه در نظر می‌گیریم بدست آوریم. چگالی انرژی زمانی و چگالی انرژی فرکانسی جهت تشییع موقعیت فیزیکی کافی نمی‌باشند زیرا آنچه را که رخ می‌دهد بطور کامل نشان نمی‌دهند. با توجه به ورود به ناحیه غیرخطی، روش‌های زمان-فرکانس برای سیستم‌های متغیر با زمان مثل سدهای آسیب دیده برای اطلاع از زمان شروع آسیب یا روند تغییرات فرکانسی با گسترش ترک در مقابل زمان بهتر است.

یکی از روش‌های مهم و پیشرفته در حوزه زمان- فرکانس، روش تبدیل موجک می‌باشد؛ این روش با تجزیه و توزیع سیگنال در هر دو حوزه زمانی و فرکانسی، قادر به تعیین مشخصات و محتوی داخلی آن می‌باشد. برترین ویژگی روش تبدیل موجک، خاصیت آنالیز چند رزولوشنی آن می‌باشد؛ در واقع همین خصوصیت بررسی، عامل اصلی روی آوردن از تبدیل فوریه زمان کوتاه به تبدیل موجک است. بنابراین می‌توان یک سیگنال تاریخچه زمانی را با استفاده از روش تبدیل موجک به حوزه زمان- فرکانس بده و آن را به مؤلفه‌های فرکانسی غالب تجزیه و سیگنال‌های تک فرکانس غالب را به منظور محاسبه میرایی ایجاد نمود. تبدیل موجک پیوسته¹ به صورت کانولوشن² سیگنال $(t)x$ و نمونه‌های مختلف موجک‌های اتساع و انتقال یافته از موجک مادر، تعریف می‌شود:

$$CWT_x^\psi(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (10)$$

که در آن b و a ، به ترتیب پارامترهای انتقال³ و مقیاس⁴ می‌باشند و CWT نیز ضریب تبدیل موجک مادر نامیده می‌شود. در رابطه (10)، ψ تابع پنجه است که اصطلاحاً موجک مادر نامیده می‌شود. مفهوم انتقال دقیقاً مشابه با مفهوم انتقال زمانی در تبدیل فوریه زمان کوتاه است که میزان جابجایی پنجه را معلوم می‌کند و به وضوح، اطلاعات زمانی تبدیل را دربردارد. اما برخلاف تبدیل فوریه زمان کوتاه، در تبدیل موجک به طور مستقیم پارامتر فرکانس نداریم. در عوض، پارامتر مقیاس را داریم که به طور معکوس با فرکانس ارتباط دارد. با توجه به هدف تحقیق، نوع کاربرد و شرایط سیگنال، ممکن است یک موجک خاص انتخاب شود. تبدیل موجک را می‌توان تبدیل فوریه‌ای در نظر گرفت که ابعاد پنجه آن متغیر می‌باشد که تغییرات ابعاد پنجه بستگی به ماهیت سیگنال مورد بررسی دارد. به عبارت دیگر برخلاف تبدیل‌های زمان- فرکانس که دارای طول پنجه‌های ثابت در حوزه زمان و فرکانس هستند، طول این پنجه‌ها در حوزه زمان و فرکانس متغیر هستند، بنابراین از این لحاظ نسبت به تبدیل‌های زمان- فرکانس دارای انعطاف بیشتری در پردازش سیگنال‌های نامان هستند. طبق رابطه (10)، چنین می‌توان بیان کرد که تبدیل موجک از ضرب داخلی تابع $(t)x$ و سخه انتقال یافته و مقیاس شده تابع موجک $(t)\psi_{a,b}$ بدست می‌آید. تابع موجک به صورت رابطه (11) می‌باشد [26]:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (11)$$

در نتیجه تبدیل موجک ارائه شده در رابطه (10) به صورت رابطه (12) نیز قابل نمایش است:

¹ Continuous wavelet transform

² Convolution

³ Location parameter

⁴ Scaling parameter

چسبنده بر پایه خواص بتن آن ساخته می‌شود. با توجه به مقاومت مجاز کششی بتن بدنه، ماکریم متش اصلی مطابق با معیار کشش جدایش، برابر 3.76 مگاپاسگال می‌باشد. برآورده خرابی از نوع انرژی با انرژی شکست 300 نیوتن بر متر در نظر گرفته شده است. ضریب ویسکوزیته برای چسبنده پایدارسازی آسیب⁴ بمنظور همگرا کردن آنالیز غیرخطی برابر⁶ 10 است.

5-1- نتایج تحلیل سد سالم و روش اجزای چسبنده ترک توسعه‌یافته
 زلزله کوینا یکی از شدیدترین رکوردهای گزارش شده در سطح دنیا می‌باشد که باعث ایجاد ترک‌های شدید در سد بتی دنیا می‌باشد. مطابق شکل 6، شتابنگاشت زلزله کوینا باعث ترک‌خوردگی بدنه سد و همچنین آسیب‌دیدگی موضعی در نواحی تکیه‌گاهی سد کارون 3 شده است. بنابراین با استفاده از تحلیل مدل المان محدود توسعه‌یافته سد، نواحی مستعد آسیب، ترک خوردگه در داخل بدنه گسترش پیدا خواهد کرد و حتی ممکن است کل سازه دچار شکست و گسیختگی شود. لازم به ذکر است که اثر درزهای اجرایی در نظر گرفته نشده است. ترک‌خوردگی از ثانیه 4.09 شروع شده و تا ثانیه 4.14 منجر به رشد ترک 53 متری در داخل بدنه سد می‌شود. در شکل 7، هندسه سه بعدی ترک عمیق ایجاد شده در بدنه نشان داده شده است. بنابراین الگوی ترک‌خوردگی کلی بدنه سد کارون 3 حین زلزله پیش‌بینی شده و قابل بررسی است تا نقاط ضعف آن تقویت شود. در اشکال 8 تا 10 به ترتیب مقایسه تغییرمکان عرضی، طولی و قائم نقطه وسط تاج سد تحت زلزله آورده شده است. بیشترین محدوده تغییرمکان مربوط به حالت طولی می‌باشد در حالیکه محدوده تغییرمکان عرضی و قائم یکسان است. همچنین الگوی تغییرمکان طولی و قائم شبیه بهم می‌باشد، چراکه شتابنگاشت اعمالی زلزله در جهت طولی و قائم یکسان است. در حالیکه الگوی تغییرمکان عرضی متفاوت با دو تغییرمکان دیگر است. ماکریم تغییرمکان طولی، عرضی و قائم به ترتیب با تحلیل المان محدود، برابر 0.151، 0.021 و 0.033 و با تحلیل



Fig 4 Karun 3 dam and its reservoir and appurtenant

شکل 4 نمایی از بدنه سد کارون 3، مخزن و سازه‌های جنبی

نهایی فشاری بتن 35 مگاپاسگال می‌باشد. میرایی سد به روش رایلی با نسبت میرایی بحرانی 3 درصد با استفاده از فرکانس طبیعی اول و سوم سازه بدست آمده است. رفتار سد با استفاده از نرم‌افزار آبکوس ابتدا به صورت الاستیک خطی با المان C3D8R، گام زمانی 0.01 و بطول 10 ثانیه در نظر گرفته می‌شود. مدل المان محدود و مشبندی مناسب آن پس از حساسیت‌سنجی در شکل 5 ارائه شده است. شتابنگاشت اعمال شده براساس مولفه‌های افقی و قائم زلزله کوینا می‌باشد که با بزرگنمایی 3 برابر وارد شده است. برای مولفه طولی¹ و قائم² از مولفه افقی و برای مولفه عرضی³ از مولفه قائم زلزله کوینا استفاده شده است. اعمال مولفه‌های زلزله و بزرگنمایی آن به صورتی بوده است که در نهایت ترک در داخل بدنه سد به دور از تکیه‌گاه اتفاق افتد. پارهای استاتیکی شامل وزن و فشار آب هیدرواستاتیک است. برای آسیب و گسترش ترک از روش المان محدود توسعه یافته مطابق با مشبندی شکل 5 استفاده می‌شود. مدل المان محدود توسعه‌یافته سد با توجه به مدل ترک

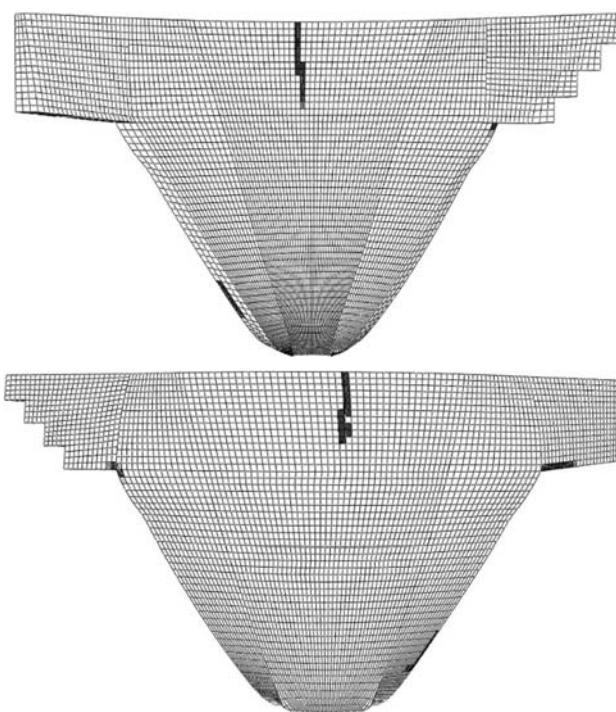


Fig. 6 The downstream and upstream face of Karun 3 dam cracks

شکل 6 ترک‌های سد کارون 3 در رویه پایین‌دست و بالادست

⁴ Damage stabilization cohesive

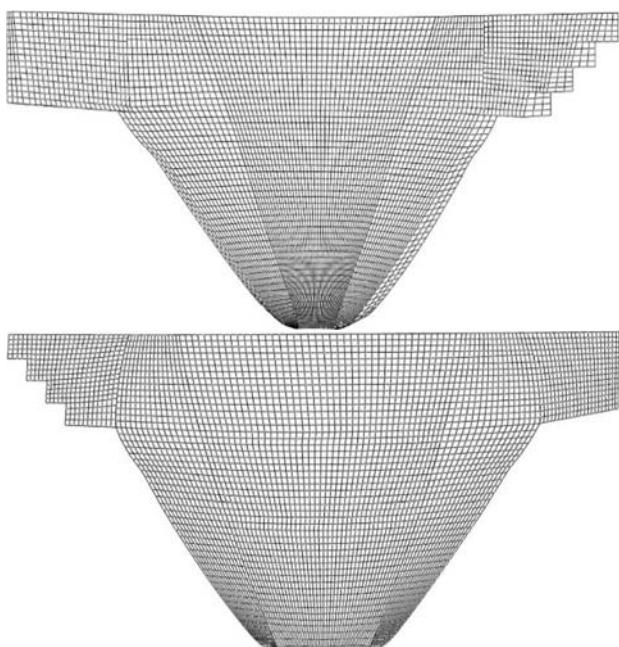


Fig 5 Finite element model of Karun 3 dam

شکل 5 مدل المان محدود سد کارون 3

¹ Longitudinal

² Vertical

³ Transversal

المان محدود توسعه‌یافته بر مبنای مدل ترک چسبنده بتن، برابر 0.163 و 0.042 می‌باشد. ملاحظه می‌شود که الگوی ترک خوردگی سد سالم و آسیب‌دیده تا قبل از ایجاد ترک بسیار شبیه به هم می‌باشد. ولی پس از گسترش ترک متفاوت خواهد بود. در حالت کلی ترک خوردگی باعث افزایش تغییرمکان‌های سد شده است.

5-2- شناسایی سیستم سد کارون 3

در این مرحله شناسایی سیستم مدل المان محدود سد به منظور شناسایی مشخصات دینامیکی و پارامترهای مودال با استفاده از تبدیل موجک پیوسته، به عنوان مبنا یا اثر انگشت برای مقایسه با نتایج سازه آسیب دیده انجام می‌شود. بنابراین کد متلبی برای بدست آوردن تبدیل موجک پیوسته پاسخ‌های سد کارون 3 نوشته شده است. در اشکال 11 تا 13 به ترتیب اسکلوگرام (مقیاس‌نگار) تغییرمکان طولی و عرضی نقطه وسط تاج سد و ترکیب مولفه افقی و قائم زلزله کوینا نشان داده شده است. با توجه به اینکه الگوی تغییرمکان طولی و قائم شبیه بهم می‌باشد، لذا فقط مقیاس‌نگار تغییرمکان طولی ارائه شده است. با استفاده از مقیاس‌نگار تغییرمکان طولی و عرضی فرکانس‌های طبیعی سیستم قابل تشخیص است. با توجه به شکل 13، می‌توان گفت که وجود فرکانس‌های دیگر به صورت پر اثری در مقیاس‌نگار پاسخ سازه ناشی از اثرات تحریک ورودی به سیستم است. در جدول 1، مقایسه‌ای بین 3 فرکانس طبیعی اول سد حاصل از تبدیل موجک و نرمافزار آباکوس ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که با وجود قابلیت بالای تبدیل موجک در شناسایی سیستم، پاسخ طولی و قائم دقیق‌تری نسبت به پاسخ عرضی در تشخیص فرکانس طبیعی سیستم دارد.

6- شناسایی آسیب بر مبنای شناسایی سیستم

در این مرحله با استفاده از پارامترهای مودال بدست آمده از سازه آسیب‌دیده با پارامترهای مودال سازه سالم مورد مقایسه قرار گیرد. سپس براحتی می‌توان اثرات ترک خوردگی و رفتار غیرخطی بر روی سد را ارزیابی کرد. با بررسی و مقایسه پنجره زمان-فرکانس (اسکلوگرام) پاسخ سازه و پارامترهای مودال بدست آمده از مدل عددی، می‌توان به سیر تغییرات فیزیکی بوجود آمده در سازه، زمان شروع ترک خوردگی و نیز تشخیص محل آسیب صورت گرفته، با استفاده از مقایسه شکل مودهای ارتعاشی در حالت سالم و آسیب دیده پرداخت.

6-1- شناسایی زمان شروع آسیب

اشکال 14 و 15 به ترتیب مقیاس‌نگار جابجایی طولی و عرضی نقطه وسط تاج سد ترک خورده را نشان می‌دهد. با مقایسه اشکال 14 و 15 به ترتیب با اشکال 11 و 12، می‌توان گفت پس از رخداد ترک فرکانس‌های طبیعی سیستم کاهش می‌یابد. در واقع تأثیر ترک در ساختار سازه به صورت تغییرات موضعی سختی است که این تغییرات در ساختار دینامیکی سازه اثر

جدول 1 مقایسه فرکانس‌های طبیعی سد کارون 3

Table 1 Comparison of natural frequencies of Karun 3 dam

آباکوس (هرت)	تبدیل موجک پیوسته (هرت)		
	پارامتر پاسخ عرضی	پاسخ طولی و قائم	فرکانس طبیعی اول
2.24	2.27	2.17	فرکانس طبیعی اول
2.72	2.58	2.58	فرکانس طبیعی دوم
3.40	2.75	3.03	فرکانس طبیعی سوم

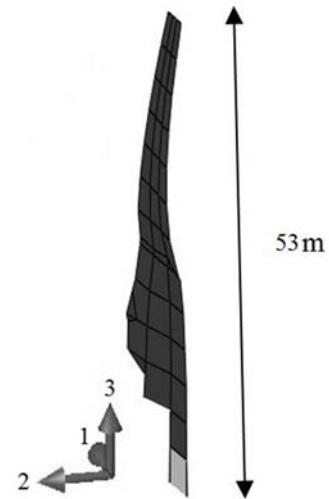


Fig.7 The 3D central crack pattern of Karun 3 dam

شکل 7 هندسه سه بعدی ترک مرکزی سد کارون 3

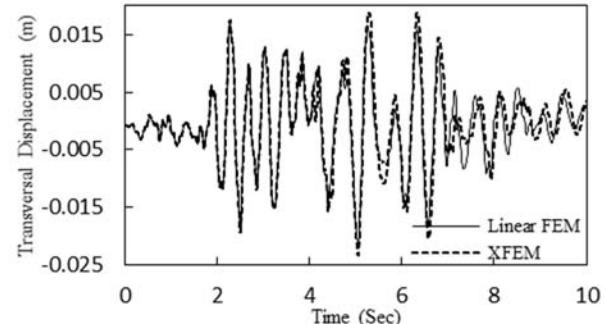


Fig.8 Comparison of dam crest midpoint transversal displacement

شکل 8 مقایسه تغییرمکان عرضی نقطه وسط تاج سد

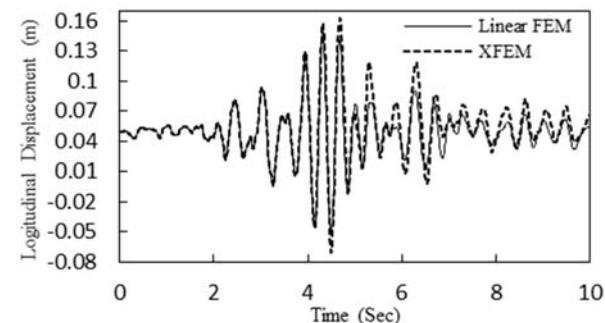


Fig.9 Comparison of crest midpoint longitudinal displacement

شکل 9 مقایسه تغییرمکان طولی نقطه وسط تاج سد

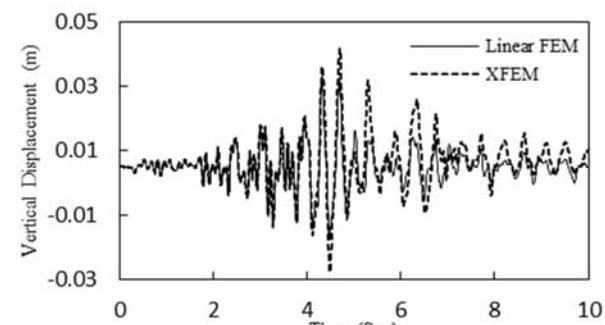


Fig.10 Comparison of crest midpoint vertical displacement

شکل 10 مقایسه تغییرمکان قائم نقطه وسط تاج سد

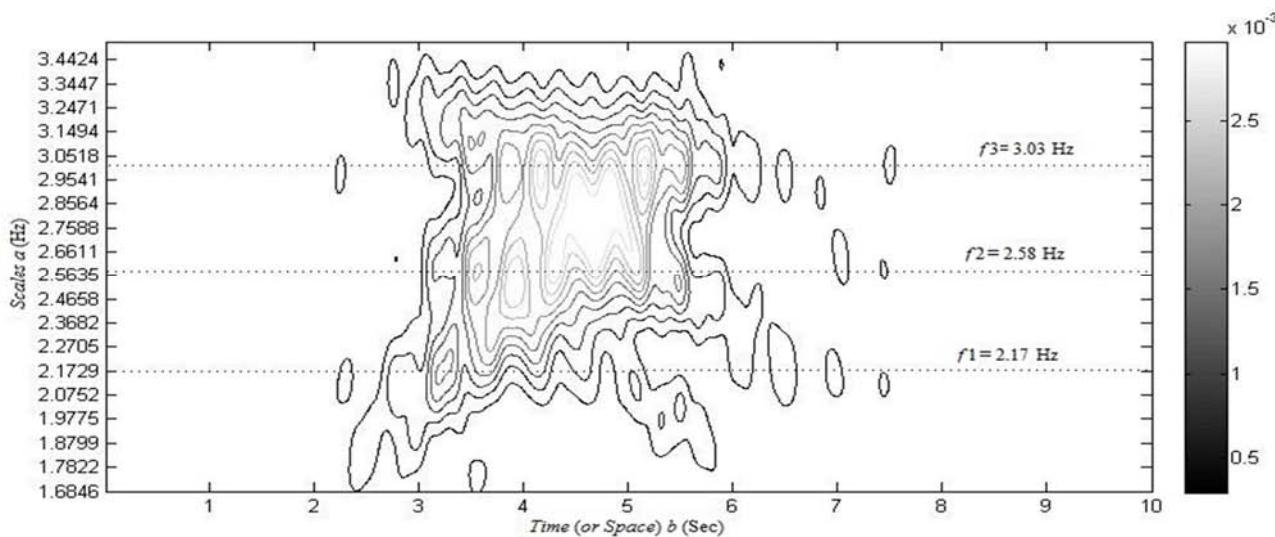


Fig. 11 The scalogram of intact dam crest midpoint longitudinal displacement (Sec-Hz)

شکل 11 مقیاس نگار پاسخ جابجایی طولی نقطه وسط تاج سد سالم (ثانیه - هرتز)

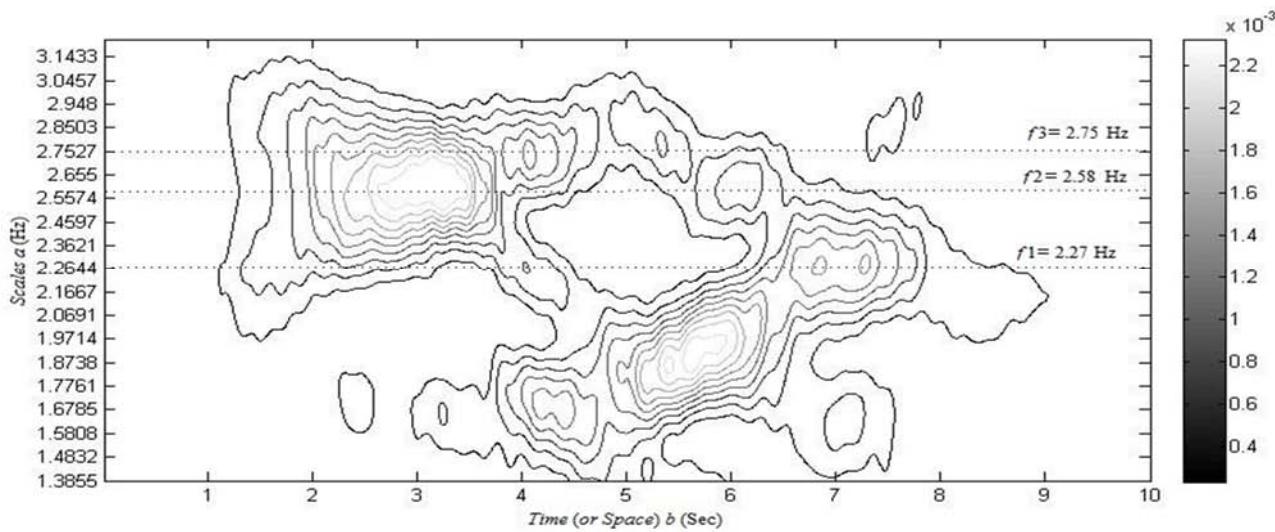


Fig. 12 The scalogram of intact dam crest midpoint transversal displacement (Sec-Hz)

شکل 12 مقیاس نگار پاسخ جابجایی عرضی نقطه وسط تاج سد سالم (ثانیه - هرتز)

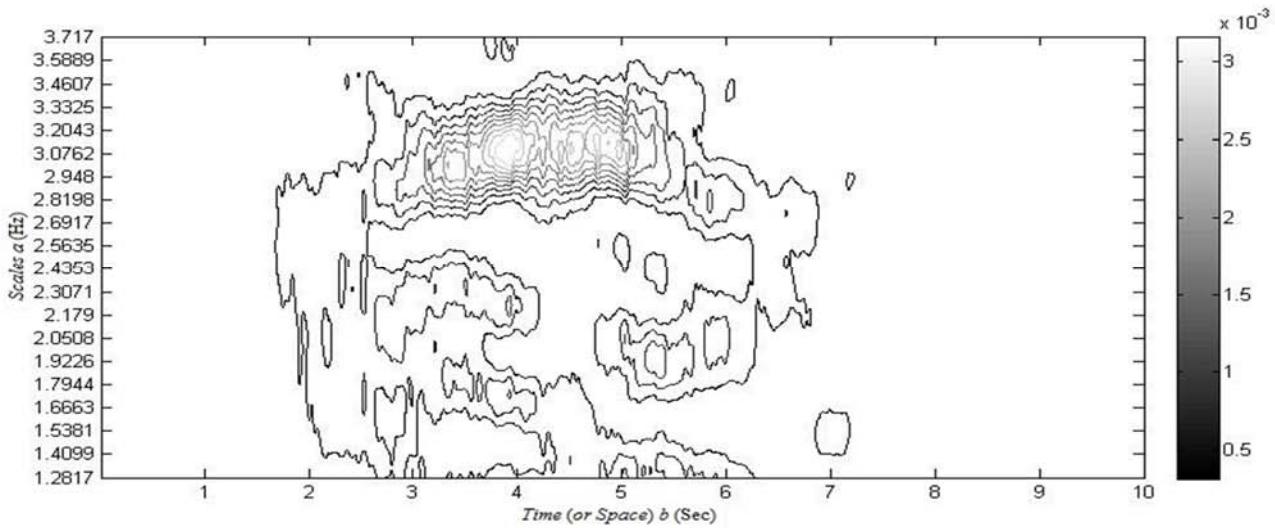


Fig. 13 The scalogram of Koyna earthquake horizontal and vertical components summation (Sec-Hz)

شکل 13 مقیاس نگار ترکیب مولفه افقی و قائم زلزله کوینا (ثانیه - هرتز)

در این مرحله بایستی شکل مودهای ارتعاشی بدست آمده از سازه آسیب‌دیده با شکل مودهای ارتعاشی سازه سالم مورد مقایسه قرار گیرد. سپس براحتی می‌توان به تشخیص محل آسیب صورت گرفته پرداخت. بدین منظور از پاسخ‌های تغییر مکان طولی سد در نقاط مختلف طره مركزی و تراز تاج سد با فواصل مساوی 20 متری استفاده شده است. برای تعیین اشکال مودی ابتدا باید یک کانال مرجع از بین نقاط مختلف در نظر گرفته شود.

سپس اشکال مودی با توجه به دامنه و فاز ضرایب تبدیل موجک در فرکانس‌های طبیعی سازه (فرکانس‌های تشديد) تعیین می‌شوند که این مقادیر، از نسبت پاسخ‌های اندازه‌گیری شده در کانال متحرک به کانال مرجع به دست می‌آید. در اشکال 16 و 17، به ترتیب مقایسه اشکال مودی سازه سالم و آسیب‌دیده برای طره مركزی و پلان تراز تاج ملاحظه می‌شود. همچنین در شکل 18، نتایج نرم‌افزار آباکوس برای 3 مود اول (بزرگنمایی 30 برابر) ارائه شده است.

با توجه به اشکال 16 تا 18، دو مشکل عمده وجود دارد. اولاً با توجه به نزدیک بودن فرکانس‌های طبیعی سازه سد کارون 3، با عوض کردن مولفه فرکانسی سیگنال، تمامی اشکال مودی بدست آمده در محدوده فرکانس طبیعی اول تا سوم سد کاملاً شبیه بهم بوده و تغییری نمی‌کند. این مسئله

قابل توجهی دارد. بنابراین ترک خوردگی باعث کاهش سختی و صلابت سیستم سد کارون 3 شده است. واضح است که در این مرحله هرچه ترک در بدنه سد بیشتر رشد کرده باشد، پنجه زمان - فرکانس (اسکلوگرام) قابلیت بهتری برای شناسایی ترک خوردگی و تغییرات فیزیکی سیستم خواهد داشت. به خصوص در مورد سد کارون 3 که نزدیکی فرکانس‌های طبیعی سازه و نیز اثر تحریک ورودی در سیستم، تحلیل نتایج را پیچیده می‌کند. با توجه به شکل 14، ملاحظه می‌شود پس از ترک خوردگی هر 3 فرکانس طبیعی سازه کاهش پیدا می‌کند بطوریکه پس از آن اندکی افزایش یافته تا به مرز پایداری برسد. بنظر می‌رسد مقداری تأخیر در کاهش فرکانس پس از ترک خوردگی علی الخصوص در مورد فرکانس دوم و سوم وجود داشته باشد. در شکل 15 نیز بطور کلی فرکانس‌های طبیعی نسبت به شکل 12 به صورت پرانرژی وجود ندارد و حالت کمرنگ‌تری دارد. با مقایسه اشکال 14 و 15، کاهش در فرکانس نگار پاسخ طولی و قائم نسبت به مقیاس‌نگار پاسخ عرضی وجود دارد.

6-2- شناسایی مکان آسیب

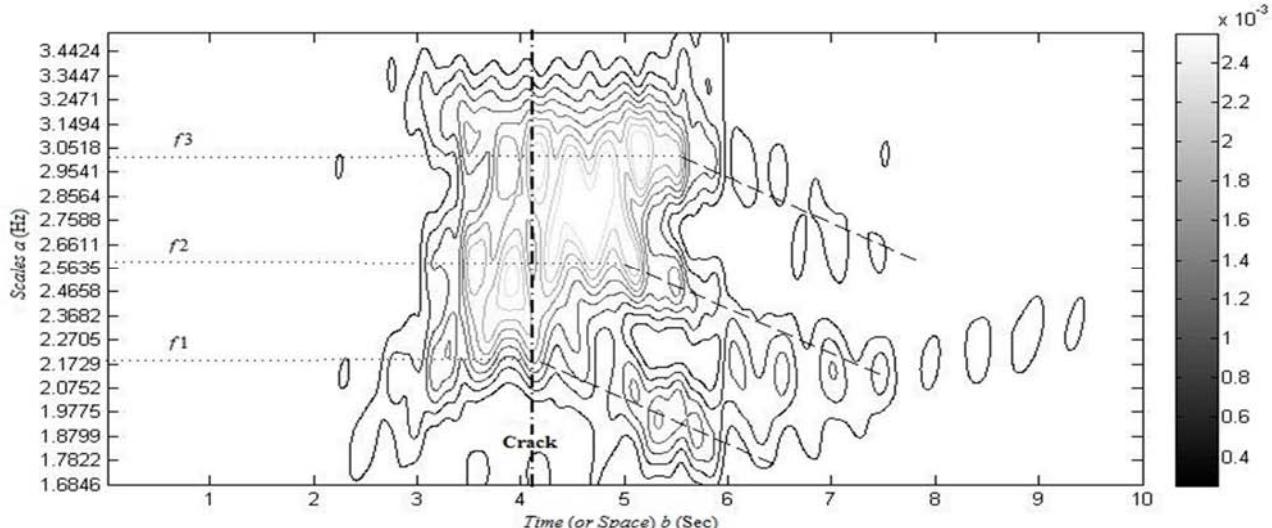


Fig. 14 The scalogram of cracked dam crest midpoint longitudinal displacement (Sec-Hz)

شکل 14 مقیاس‌نگار پاسخ جابجایی طولی نقطه وسط تاج سد آسیب دیده (ثانیه - هرتز)

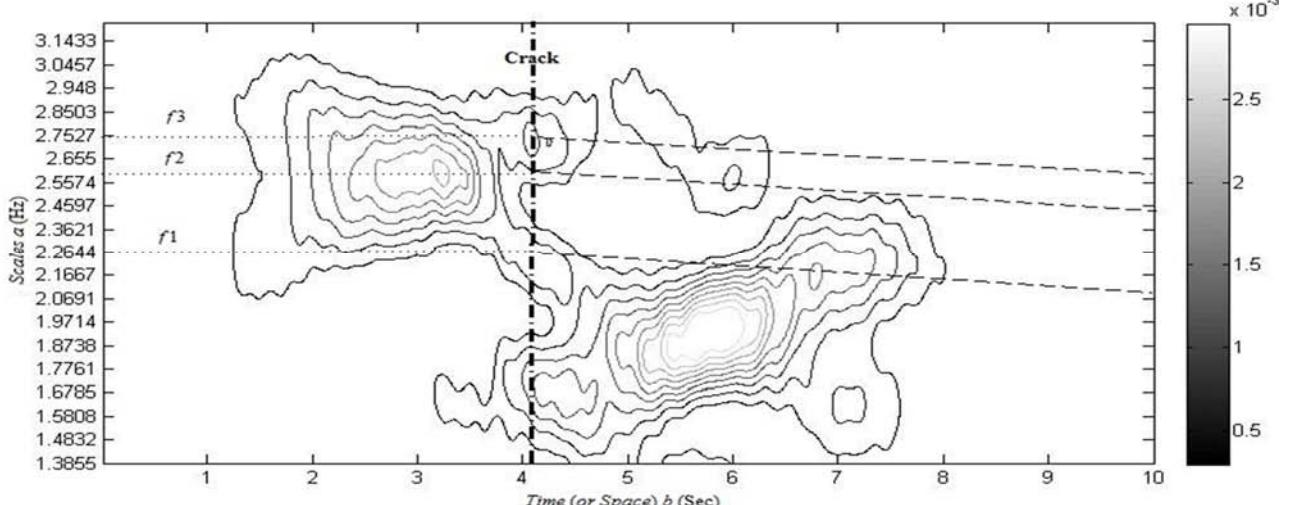


Fig. 15 The scalogram of cracked dam crest midpoint transversal displacement (Sec-Hz)

شکل 15 مقیاس‌نگار پاسخ جابجایی عرضی نقطه وسط تاج سد آسیب دیده (ثانیه - هرتز)

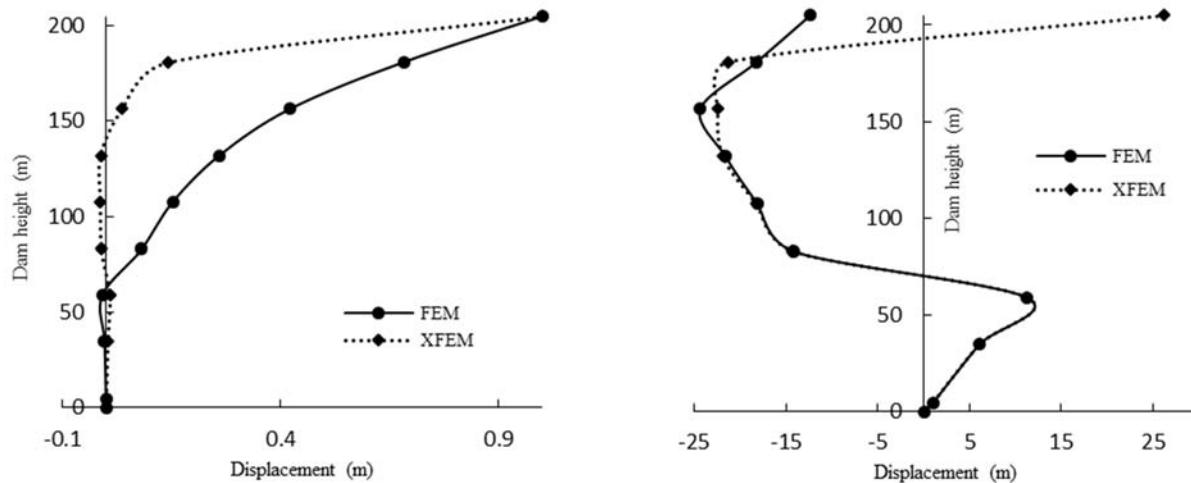


Fig. 16 Comparison of the cantilever mode shapes of Karun 3 intact and cracked dam normalized to abutment (right) and crest (left) using WT

شکل ۱۶ مقایسه شکل مودی طره مرکزی سد کارون ۳ همپایه شده نسبت به تکیه گاه (راست) و تاج (چپ) برای سازه سالم و آسیب دیده با استفاده از تبدیل موجک

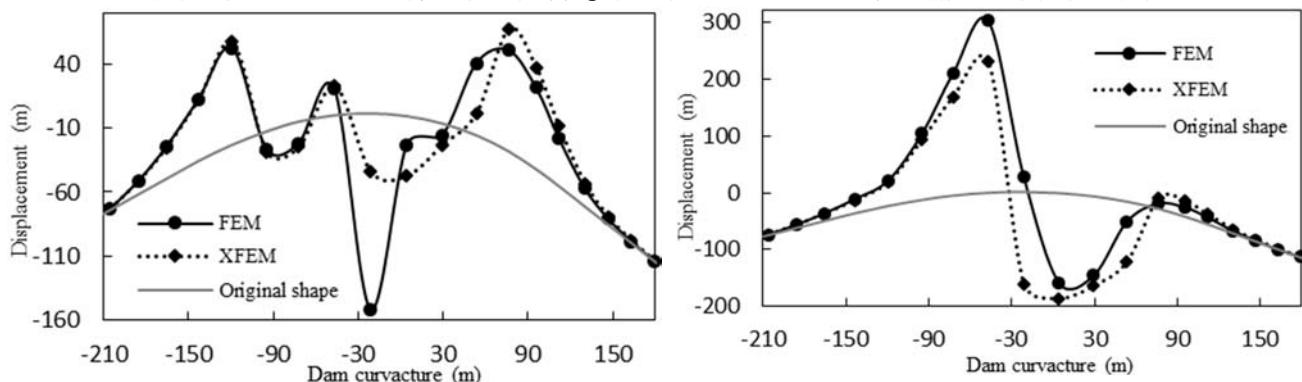


Fig. 17 Comparison of crest mode shapes of Karun 3 intact and cracked dam normalized to right abutment (right) and left abutment (left) using WT

شکل ۱۷ مقایسه شکل مودی تراز تاج سد کارون ۳ همپایه شده نسبت به تکیه گاه راست (راست) و تکیه گاه چپ (چپ) برای سازه سالم و آسیب دیده با استفاده از تبدیل موجک

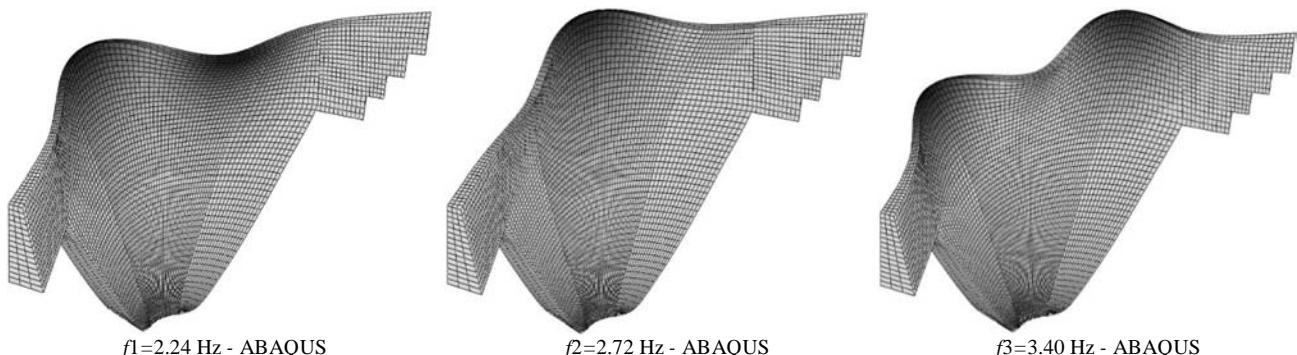


Fig. 18 Results of the first 3 mode shapes of Karun 3 dam obtained from Abaqus software

شکل ۱۸ نتایج ۳ شکل مودی اول سد کارون ۳ با استفاده از نرم افزار آباکوس

پیوسته) با استفاده از خروجی تنها بوده و ورودی به صورت نویز سفید^۱ در نظر گرفته می شود، لذا چنین مشکلی مورد انتظار می باشد. همچین عدم درنظر گرفتن جرم مودی هم می تواند تاثیرگذار باشد. برای رفع این مشکل بر پایه اثر ورودی (از زله اعمالی)، باید ضرایب اصلاح شکل مودی با استفاده از میزان سازی مودی² اعمال گردد. با توجه به مشکلات ارائه شده، چون هدف تحقیق حاضر شناسایی آسیب بر پایه شناسایی سیستم می باشد، بنابراین شکل مودی های بدست آمده به همین صورت مبنای تحلیل بوده و از آنها استفاده می شود.

با توجه به شکل ۱۶، برای شکل مودی طره مرکزی ملاحظه می شود که

ناشی از تداخل مودی می باشد که اثر شکل مودی غالب موجود در سیگنال باعث تغییر در فاز اشکال مودی دیگر می شود تا نتیجه به صورت یک شکل ثابت در محدوده فرکانس اول تا سوم مطابق اشکال ۱۶ و ۱۷ ارائه شود. برای رفع مشکل باید اثر اشکال مودی دیگر از شکل مودی مورد نظر حذف گردد.

ثانیاً انتخاب کانال مرجع در پیدا کردن شکل مودی طره مرکزی و شکل مودی در پلان تراز تاج از اهمیت بسزایی برخوردار است. مطابق شکل ۱۶ و ۱۷ ملاحظه می شود که، با تغییر کانال مرجع شکل مودی متفاوتی بدست خواهد آمد. در واقع با تغییر کانال مرجع، فاز و دامنه نقاط دیگر نسبت به آن کانال عوض شده و باعث عدم ثبات شکل مودی می شود. همانطور که در بخش ۶ اشاره گردید، از آنجایی که روش پردازش سیگنال (تبدیل موجک

¹ White Gaussian noise² Modal scaling

ترک خوردگی لرزه‌ای و رفتار غیرخطی بر روی سد را ارزیابی کرد.

8- مراجع

- [1] T. Belytschko, Y. Y. Lu, L. Gu, Element free Galerkin methods, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 37, No. 2, pp. 229-256, 1994.
- [2] M. Fleming, Y. Chu, B. Moran, T. Belytschko, Y. Lu, L. Gu, Enriched element-free Galerkin methods for crack tip fields, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 40, No. 8, pp. 1483-1504, 1997.
- [3] J. M. Melenk, I. Babuška, The partition of unity finite element method: basic theory and applications, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 139, No. 1, pp. 289-314, 1996.
- [4] C. A. Duarte, J. T. Oden, An h-p adaptive method using clouds, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 139, No. 1, pp. 237-262, 1996.
- [5] N. Moes, J. Dolbow, T. Belytschko, A Finite Element Method for Crack Growth Without Remeshing, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 46, No. 1, pp. 131-150, 1999.
- [6] C. Daux, N. Moes, J. Dolbow, N. Sukumar, T. Belytschko, Arbitrary cracks and holes with the extended finite element method, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 48, No. 12, pp. 1741-1760, 2000.
- [7] N. Sukumar, N. Moes, B. Moran, T. Belytschko, Extended finite element method for three-dimensional crack modelling, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 48, No. 11, pp. 1549-1570, 2000.
- [8] V. Lotfi, R. Espandar, Seismic analysis of concrete arch dams by combined discrete crack and non-orthogonal smeared crack technique, *Engineering Structures*, Vol. 26, No. 1, pp. 27-37, 2004.
- [9] O. Omidi, S. Valliappan, V. Lotfi, Seismic cracking of concrete gravity dams by plastic-damage model using different damping mechanisms, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 63, pp. 80-97, 2013.
- [10] C. Bao, H. Hao, Z.-X. Li, X. Zhu, Time-varying system identification using a newly improved HHT algorithm, *Computers & Structures*, Vol. 87, No. 23, pp. 1611-1623, 2009.
- [11] Z. Chen, A. Bunker, X. Zhang, R. G. Jeffrey, Cohesive zone finite element-based modeling of hydraulic fractures, *Acta Mechanica Solidia Sinica*, Vol. 22, No. 5, pp. 443-452, 2009.
- [12] A. Ghaemmaghami, M. Ghaemian, Shaking table test on small-scale retrofitted model of Sefid-rud concrete buttress dam, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 39, No. 1, pp. 109-118, 2010.
- [13] J. Pan, C. Zhang, Y. Xu, F. Jin, A comparative study of the different procedures for seismic cracking analysis of concrete dams, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 31, No. 11, pp. 1594-1606, 2011.
- [14] A. Byfut, A. Schröder, hp-adaptive extended finite element method, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 89, No. 11, pp. 1392-1418, 2012.
- [15] G. Bhardwaj, I. Singh, B. Mishra, Numerical simulation of plane crack problems using extended isogeometric analysis, *Procedia Engineering*, Vol. 64, pp. 661-670, 2013.
- [16] S. Zhang, G. Wang, X. Yu, Seismic cracking analysis of concrete gravity dams with initial cracks using the extended finite element method, *Engineering Structures*, Vol. 56, pp. 528-543, 2013.
- [17] A. Nasirmanesh, S. Mohammadi, XFEM buckling analysis of cracked composite plates, *Composite Structures*, Vol. 131, pp. 333-343, 2015.
- [18] Z. Wang, T. Yu, T. Q. Bui, N. A. Trinh, N. T. H. Luong, N. D. Duc, D. H. Doan, Numerical modeling of 3-D inclusions and voids by a novel adaptive XFEM, *Advances in Engineering Software*, Vol. 102, pp. 105-122, 2016.
- [19] R. Tarinejad, M. Damadipour, Extended FDD-WT method based on correcting the errors due to non-synchronous sensing of sensors, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 72, pp. 547-566, 2016.
- [20] Q. Xiao, B. Karihaloo, Improving the accuracy of XFEM crack tip fields using higher order quadrature and statically admissible stress recovery, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 66, No. 9, pp. 1378-1410, 2006.
- [21] S. Mohammadi, *Extended finite element method: for fracture analysis of structures*, London: Wiley, pp. 61-75, 2008.
- [22] G. I. Barenblatt, The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture, *Advances in applied mechanics*, Vol. 7, No. 1, pp. 55-129, 1962.
- [23] D. Dugdale, Yielding of steel sheets containing slits, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 8, No. 2, pp. 100-104, 1960.
- [24] N. Moes, T. Belytschko, Extended finite element method for cohesive crack growth, *Engineering fracture mechanics*, Vol. 69, No. 7, pp. 813-833, 2002.
- [25] ABAQUS, V. 6.14, *Online Documentation Help, Theory manual: Dassault Systems*, Accessed on 10 May 2016; <http://abaqus.software.polimi.it/v6.14>.
- [26] A. Mertins, *Signal Analysis: Wavelets, Time-Frequency Transforms and Applications*, London: Wiley, pp. 51-88, 1999.

در حالت همپایه شده نسبت به تکیه‌گاه (شکل سمت راست)، از محلی که رفتار شکل مودی سازه آسیب دیده در مقایسه با سازه سالم متفاوت می‌شود، ترک خوردگی اتفاق افتاده است. بطوریکه با نردیکتر شدن به تاج سد، اختلاف جابجایی بیشتر شده و محل آسیب مشهودتر است. ولی در حالت همپایه شده نسبت به تاج (شکل سمت چپ)، اگرچه می‌توان گفت در محلی که بیشترین اختلاف جابجایی وجود دارد، آسیب اتفاق افتاده است. اما امکان تشخیص محدوده آسیب بطور دقیق وجود ندارد. بنابراین شکل مودی طریق مرکزی در حالت همپایه شده نسبت به تکیه‌گاه، قابلیت بیشتری برای تشخیص آسیب در تاج دارد.

با توجه به شکل 17، در حالت همپایه شده نسبت به تکیه‌گاه راست (شکل سمت راست)، در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها رفتار سازه سالم و آسیب دیده شبیه به هم است. ولی رفته رفته با دور شدن از تکیه‌گاه‌ها رفتار سازه متفاوت شده تا اینکه دقیقاً در محل آسیب و ترک خوردگی بیشترین اختلاف وجود دارد. در حالت همپایه شده نسبت به تکیه‌گاه چپ (شکل سمت چپ)، ملاحظه می‌شود که مشابهت بیشتری بین رفتار سازه سالم و آسیب دیده در نقطه‌ای با بیشترین اختلاف جابجایی آسیب وجود دارد. در حالت کلی دامنه حرکتی نسبت به فرم اولیه بدنه در تکیه‌گاه راست (شکل سمت راست) نسبت به حالت همپایه شده نسبت به تکیه‌گاه چپ (شکل سمت چپ) بیشتر است. ولی امکان تشخیص آسیب و ترک خوردگی با استفاده از حالت همپایه شده نسبت به تکیه‌گاه چپ بهتر است.

7- نتیجه‌گیری

در این تحقیق شناسایی آسیب بر مبنای شناسایی سیستم سد بتی دوقویی کارون 3 با استفاده از روند پیشنهادی بر مبنای ترکیب روش اجزاء چسبنده ترک توسعه‌یافته و تبدیل موجک پیوسته انجام شد. با بررسی اسکلوگرام (ینجره زمان-فرکانس) پاسخ‌های نقطه وسط تاج مدل عددی سد کارون 3، با وجود قابلیت بالای تبدیل موجک در شناسایی سیستم، پاسخ طولی و قائم دقت بیشتری نسبت به پاسخ عرضی در تشخیص فرکانس طبیعی سیستم و بررسی موقع آسیب دارد. پس از رخداد ترک هر 3 فرکانس طبیعی سازه کاوش پیدا می‌کند بطوریکه پس از آن اندکی افزایش یافته تا به مرز پایداری برسد. کاهش در فرکانس طبیعی سیستم در پاسخ طولی و قائم نسبت به پاسخ عرضی نمود بیشتری دارد. با استفاده از مقایسه شکل مودهای ارتعاشی طریق مرکزی و پلان تراز تاج سد در حالت سالم و آسیب دیده می‌توان به تشخیص دقیق محل آسیب و محدوده ترک پرداخت بطوریکه در نقطه‌ای که بیشترین اختلاف دامنه بین دو حالت وجود دارد، ترک خوردگی اتفاق افتاده است. با توجه به نزدیکی فرکانس‌های طبیعی سازه و نیز اثر تحریک ورودی در سیستم، مشکلاتی در انتخاب کanal مرجع برای همپایه‌سازی و همچنین تداخل مودی به وجود می‌آید که تحلیل نتایج را پیچیده می‌کند. برای شکل مودی تاج سد و طریق مرکزی، به ترتیب امکان تشخیص آسیب و ترک خوردگی با استفاده از حالت همپایه شده نسبت به تکیه‌گاه چپ و پایه سد بهتر است. بنابراین، با بررسی و ارزیابی منظم پارامترهای مودال بدست آمده از شناسایی سیستم سد بتی دوقویی بر مبنای روند پیشنهادی می‌توان الگویی کارآمد برای پایش آنلاین سلامت سازه‌ای ارائه کرد و اثبات