

بررسی رفتار دینامیکی اعضاء سازه ای آسیب دیده به روش اجزاء محدود

محمد علی لطف الهی یقین، استادیار دانشکده فنی دانشگاه ارومیه، ارومیه*

رضا شاهین پر، کارشناس ارشد سازه، دانشکده فنی دانشگاه ارومیه، ارومیه**

*تلفن: ۴۴-۰۴۴۱-۲۷۷۷۰۴۰، شماره: ۰۴۴۱-۲۷۷۷۰۲۲، پست الکترونیکی: ma.lotfollahi@mail.urmia.ac.ir

**تلفن: ۴۴-۰۴۴۱-۲۷۷۷۰۴۰، شماره: ۰۴۴۱-۲۷۷۷۰۲۲، پست الکترونیکی: shahinpar77@yahoo.com

چکیده

یکی از مراحل فرایند ترمیم و نگهداری سازه ها، تشخیص و ارزیابی محل و ابعاد خرابی و ترک خوردگی قبل از تعمیر و اصلاح آن می باشد. لیکن زمانیکه خرابی سازه کوچک بوده و یا در درون سیستم قرار دارد، تشخیص و مکان یابی آن با چشم غیر مسلح غیر ممکن بوده و می بایست از روشها و ابزار آلات خاصی بهره گرفت. یک روش سودمند و دقیق برای ارزیابی غیر مخرب سازه ها، کنترل ارتعاشی (VIBRATION MONITORING) است. این روش بر این عقیده بنا نهاده شده است که وقوع خرابی در یک سیستم سازه ای، منجر به تغییر در خواص و پاسخ دینامیکی آن سازه خواهد شد. این تحقیق به منظور بررسی پاسخ یک عضو معیوب بتن آرمه به تحریک دینامیکی و به دنبال آن شناسایی و مکان یابی عیوب و خرابی احتمالی در آن است. مطالعه بصورت عددی بوده و نرم افزار اجزاء محدود (COSMOS/M) با قابلیت هائی از جمله آنالیز مودال و تصادفی در حوزه فرکانس بکار گرفته شده است. مدل بررسی شده یک تیر کنسولی بوده و خرابیهای شبیه سازی شده نیز بصورت ترک منفرد عرضی، بوسیله جدایش مابین المانهای بتن ایجاد شده است. نمونه جهت تحلیل در حوزه فرکانس، توسط یک بار منفرد با مشخصات نوین سفید و در موقعیت انتهائی آزاد تحریک شده و در این حالت پاسخ سیستم، در نقاطی به فواصل یکسان در طول نمونه برداشت گردیده است. از این تحلیل ها نتیجه می شود که بررسی پاسخ شتاب عضو برای مکان یابی خرابی، نسبت به پاسخهای تغییر مکان و سرعت مناسب تر است، زیرا در فرکانسهای بالاتر دامنه آن بیشتر می باشد. همچنین در محل ترکها روند طبیعی پاسخ شتاب به تحریک سازه تغییر یافته و امکان شناسایی این محل مقدور می باشد.

کلید واژه ها: نوین سفید، ترک، بتن آرمه، اجزاء محدود، پاسخ دینامیکی شتاب.

۱- مقدمه

در طول عمر بهره برداری، سازه های فراوانی یافت می شوند که به هر دلیلی دچار ترک خوردگی می گردند و نیاز به ترمیم پیدا می کنند. در صورت عدم توجه با ادامه روند خرابی، کارایی اعضا در سازه دچار نقصان شده و عملکرد سازه به خطر خواهد افتاد. جهت اصلاح ترک خوردگی و مرمت، ابتدا باید محل و ابعاد ترک خوردگی تعیین شود. موقعیت و ابعاد ترک خوردگی را می توان بوسیله مشاهده مستقیم و یا غیرمستقیم (زمانی که ترک خوردگی از سطح اعضا قابل مشاهده نباشد) و یا به کمک آزمایش های مخرب و غیرمخرب بر روی سازه تعیین کرد [۱]. آزمایش های غیرمخرب گوناگونی برای این منظور وجود دارد که از جمله آزمایش غیر مخرب فراصوتی (ASTM CS97, Ultrasonic non-destructive test equipment)، رادیوگرافی (Radiography) و روش تحریک دینامیکی را می توان نام برد [۲]. از میان این روش ها، روش شناسایی دینامیکی مورد بحث در این مقاله می باشد.

بدلیل کاربرد گسترده سازه‌های بتن آرمه خصوصاً در کشورمان ایران، و زیاد بودن احتمال بروز خرابی در آنها، پاسخ دینامیکی یک عضو بتن آرمه معیوب به منظور شناسایی محل خرابی مورد مطالعه قرار گرفته است. خرابی مورد نظر یک ترک خوردگی عرضی باز است که توسط جدایش المان‌ها مدل‌سازی شده است. عمق خرابی و همچنین موقعیت آن در طول عضو متغیر است. جهت بررسی این موضوع از تحلیل عددی و نرم‌افزار اجزا محدود (Cosmos/M)، بهره گرفته شده است. در این راستا با اعمال باری با مشخصات نويز سفید تغییرات رفتاری عضو معیوب بررسی و شناسایی شده است.

۲- نحوه مدل بندی سیستم

نرم‌افزار کاسموس ۲۹ نوع المان را برای آنالیزهای خطی دینامیکی ارائه کرده است [۳]. از این میان المانهای TRUSS2D بعنوان المان محوری دو بعدی برای مدل کردن آرماتور و PLANE2D بعنوان المان پوسته‌ای برای مدل کردن بتن در صفحه، در این مقاله گزینش و بکار گرفته شده است. علت انتخاب آنها بطور مشروح در مرجع شماره [۴] ارائه شده است.

در ابتدا سطوح المان‌بندی می‌شوند، سپس خطوط نشان‌دهنده آرماتورها نیز با همان ابعاد المان بکار رفته در سطوح، المان‌بندی می‌گردند. حال باید المان‌های آرماتور به المان‌های بتن مجاور خود ممزوج شوند. اینکار توسط دستور NMERGE انجام می‌شود. لیکن قبل از اینکار، برای جلوگیری از ممزوج شدن المان‌های بتن وجوه ترک، ابتدا گره‌های روی این وجوه را توسط دستور NMODIFY، به مقدار لازم تغییر موقعیت می‌دهیم و بعد از ادغام گره‌های آرماتور گره‌های المان‌های بتن مجاور، گره‌های وجوه ترک خوردگی به موقعیت اولیه خود بازگردانده می‌شوند.

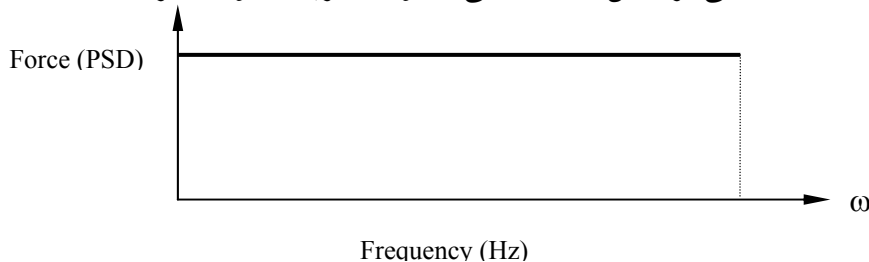
بعد از بیان روند کلی مدل‌سازی به معرفی نمونه‌های مختلف تحلیل شده می‌پردازیم. تمامی نمونه‌ها با ابعاد و مشخصات مصالح یکسان تولید شده‌اند. ولی موقعیت و عمق ترک خوردگی در آنها متفاوت است. جدول (۱-۳) لیست نمونه‌های آنالیز شده را نشان می‌دهد:

نمونه مورد تحلیل در این مقاله A1 یک تیر کنسولی بتن آرمه با طول $L=200\text{ cm}$ و ابعاد $h=40\text{ cm}$ و $b=30\text{ cm}$ با یک ترک خوردگی عرضی به عمق ده سانتیمتر که در فاصله بیست سانتیمتری از تکیه گاه گیردار در مقطع عضو اعمال شده می‌باشد. علاوه بر این نمونه، یک عضو سالم نیز با مشخصات یکسان بعنوان نمونه شاهد (N1) و برای مقایسه نتایج مدل شده است.

۳- مسائل مورد مطالعه در آنالیز تصادفی

همانطوریکه عنوان شد، بکممک مطالعه پاسخ فرکانسی یک سیستم ارتعاشی و شناسایی دینامیکی آن، می‌توان سالم یا ناسالم بودن، وجود خرابی و در اکثر موارد محل آن را تعیین کرد. برای اینکار بایستی سازه را توسط یک منبع نیرو، تحریک کرده و پاسخ آن را نیز در نقاط مختلف برداشت نموده و

سپس با تکنیک‌های خاص تبدیل فوریه سریع، داده‌های برداشت شده را به حوزه فرکانس منتقل و تغییرات آنها را مطالعه کرد. با توجه به اینکه معمولاً در کارهای آزمایشگاهی و صحرایی، که منبع تحریک چکش ضربه‌ای است [5]، [6]، تحریک بشکلی صورت می‌پذیرد که باند فرکانسی آن محدوده وسیعی را در بر می‌گیرد، در این مقاله برای تحریک عضو از نویز سفید (White Noise) و آنالیز تصادفی (Random Vibraton Analysis) بهره گرفته شده است. آنالیز تصادفی در حوزه فرکانس بوده و ورودی و خروجی‌های آن بصورت چگالی توان طیفی (Power Spectral Density (PSD)) می‌باشد. از خواص نویز سفید آن است که دامنه نیرو در تمام باند فرکانسی در نظر گرفته شده، مقدار ثابتی دارد. در چنین مسائلی برای بالابردن دقت تحلیل محدوده فرکانس نویز سفید طوری تعیین می‌شود که فرکانس آخرین مود برابر با حداقل ۸۰٪ حد بالایی باند فرکانس تحریک باشد [7]. در این پژوهش حداکثر فرکانس مورد مطالعه، متناظر با فرکانس مود دهم است و تقریباً ۲۰۰۰ هرتز می‌باشد. اگر چه در تمامی نمونه‌های آنالیز شده، حد بالایی فرکانس تحریک ۳۰۰۰ هرتز است، لیکن پاسخ در فرکانس‌های بالاتر از ۲۰۰۰ هرتز مد نظر نیست. PSD نویز سفید در تصویر (۱) نشان داده شده است. از مزایای بکارگیری نویز سفید آن است که تمامی فرکانس‌های ارتعاشی عضو را تحریک خواهد کرد [8].



شکل ۱: سیگنال نیروی ورودی با مشخصات نویز سفید

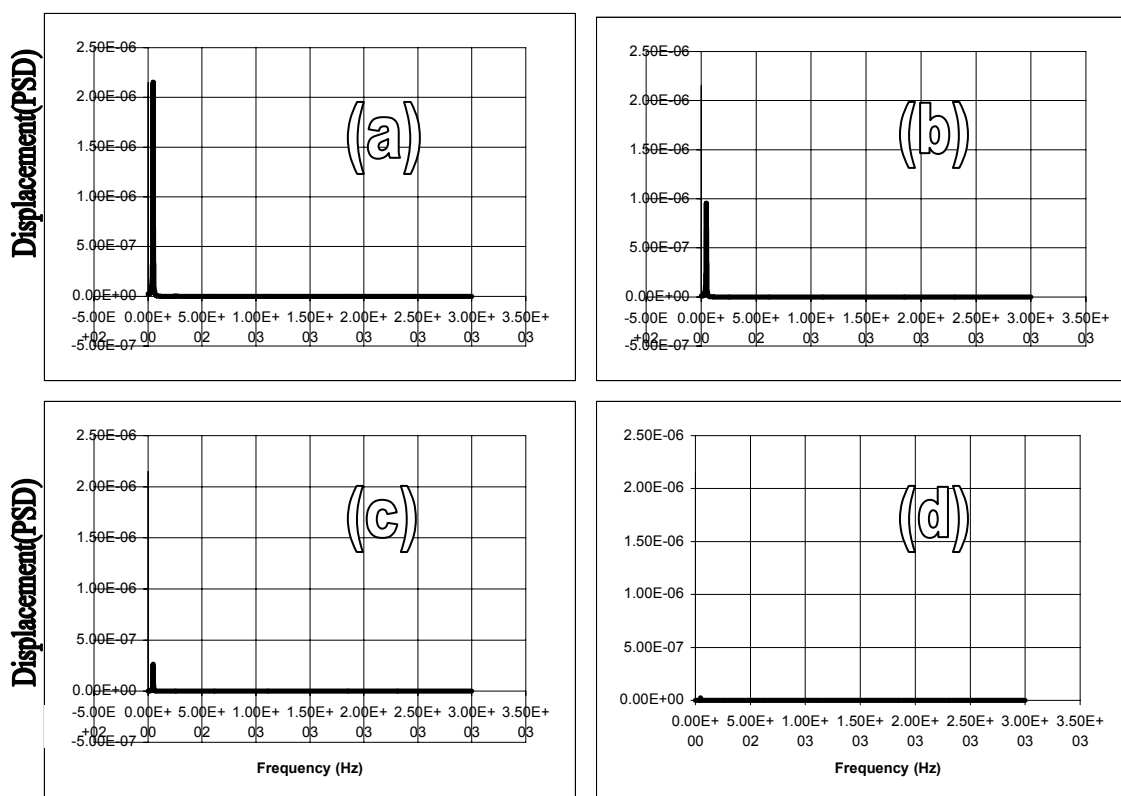
چنانکه قبلاً نیز ذکر شد، با توجه به اینکه هدف از مطالعه منحنیهای پاسخ اعم از شتاب، تغییر مکان و سرعت در برابر فرکانس، بررسی تغییرات و مقایسه آنها مابین نمونه‌های سالم و معیوب است، لذا به واحد محور قائم توجه چندانی نشده است.

در کارهای آزمایشگاهی و صحرایی، دقت در انتخاب محل اعمال نیرو و محل نصب برداشت‌کننده‌های پاسخ سیستم، در موفقیت کار بسیار تعیین‌کننده هستند و از اینرو همیشه برای تعیین محل دقیق و مناسب کار، از مطالعات عددی اجزا محدود بهره گرفته می‌شود. هدف دوری کردن از نقاط گرهی (Nodal Points) است و بنابراین می‌بایست نقاطی مد نظر باشند که حتی‌الامکان از نقاط گرهی موده‌های اساسی سازه بدور باشند. با توجه به این موضوع در نمونه‌های تحلیل شده این مقاله، انتهای آزاد عضو بعنوان محل اعمال نیروی تحریک‌کننده در نظر گرفته شده است. تحریک با بار متمرکز بصورت نویز سفید در انتهای

عضو بتنی طره (گوشه بالا) و در جهت Y انجام می‌شود. در این صورت طبیعی است که مودهای ارتعاش محوری عضو تحریک نشوند و یا دامنه پاسخ آنها بسیار اندک باشد.

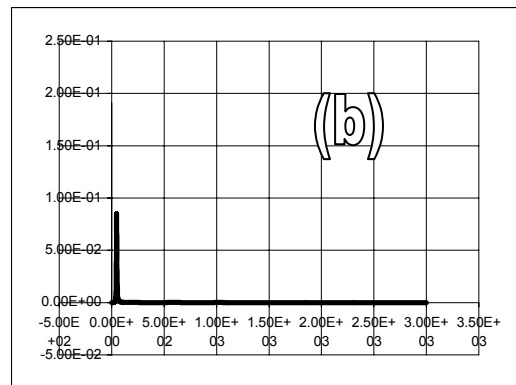
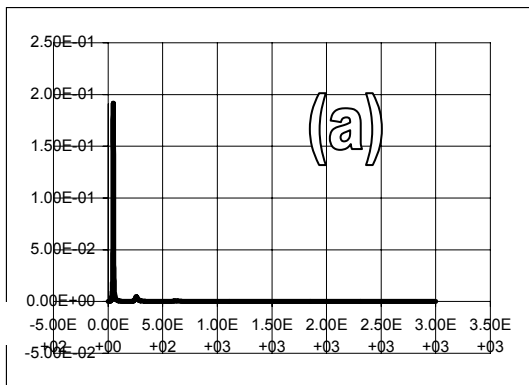
۴- بحث و بررسی نتایج تحلیل تصادفی

پاسخهای تغییرمکان، سرعت و شتاب در جهت Y و در فواصل ۵۰ و ۱۰۰ و ۱۵۰ سانتیمتری از تکیه‌گاه، همچنین انتهای آزاد عضو (۲۰۰ سانتیمتری از تکیه‌گاه، همان نقطه تحریک) و در گره‌های روی سطح نمونه (گره‌های بالایی) بترتیب در اشکال (۲) تا (۴) نشان داده شده‌اند. بر اساس اشکال فوق ملاحظه می‌شود با دور شدن از تکیه‌گاه، دامنه پاسخ برای تغییرمکان، سرعت و شتاب افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که مقادیر پاسخهای تغییرشکل و سرعت، در فرکانس‌های بالا نسبت به فرکانس‌های پایین‌تر در حد بسیار پایین (حدود صفر) هستند، مگر اینکه در واحدهای لگاریتمی ارائه شوند. لیکن نمودار شتاب گویاتر است و دامنه پاسخ آن در فرکانسهای بالاتر بیشتر است. لذا بهتر است برای مطالعه تغییرات پاسخ فرکانسی، از نمودارهای PSD شتاب پاسخ استفاده شود.

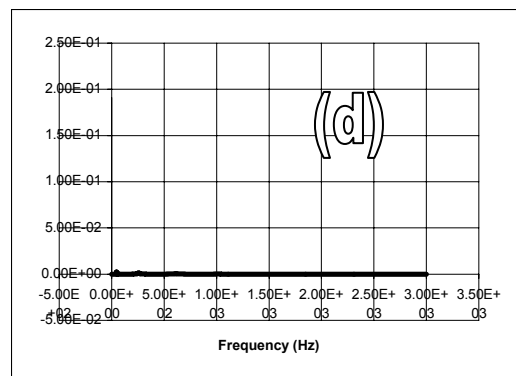
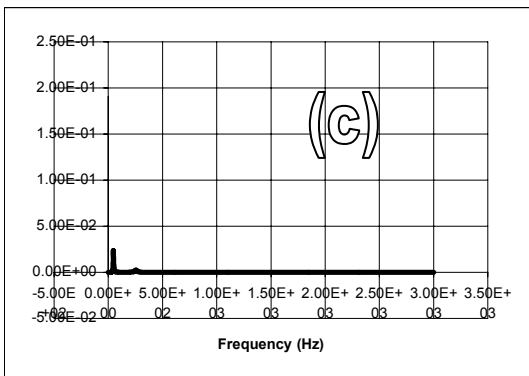


شکل ۲: پاسخ تغییرمکان در فواصل ۲۰۰ cm (a)، ۱۵۰ cm (b)، ۱۰۰ cm (c)، ۵۰ cm (d) از تکیه‌گاه

Velocity(PSD)

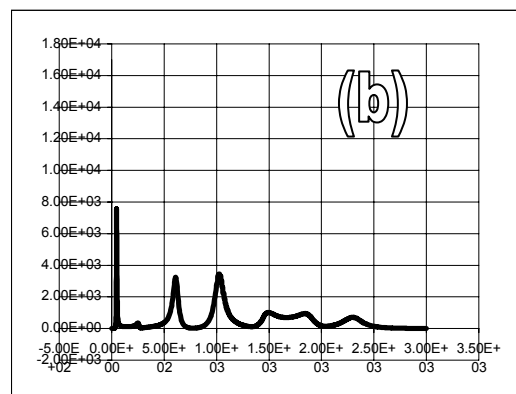
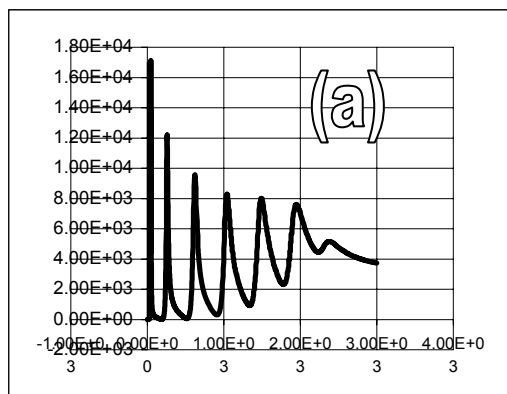


Velocity(PSD)

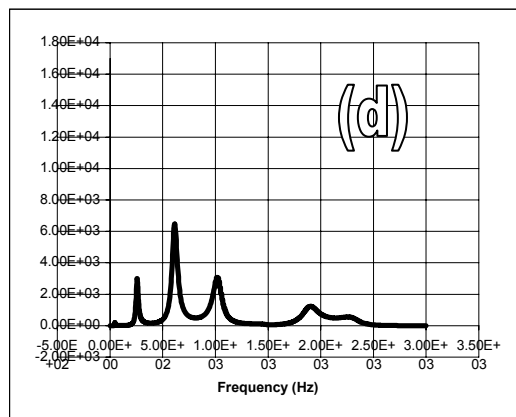
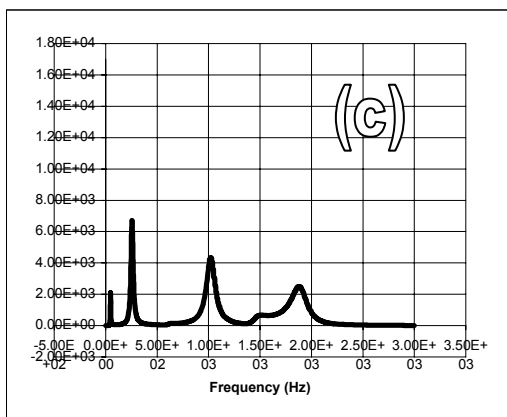


شکل ۳: پاسخ سرعت در فواصل (a) ۲۰۰ cm ، (b) ۱۵۰ cm ، (c) ۱۰۰ cm ، (d) ۵۰ cm از تکیه‌گاه

Acceleration(PSD)

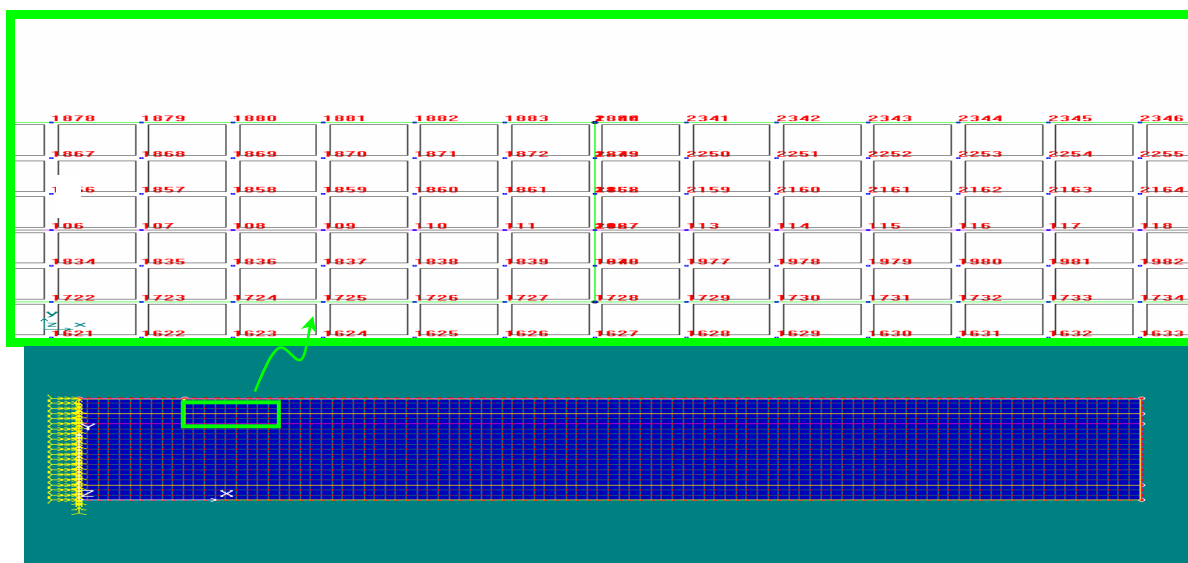


Acceleration(PSD)



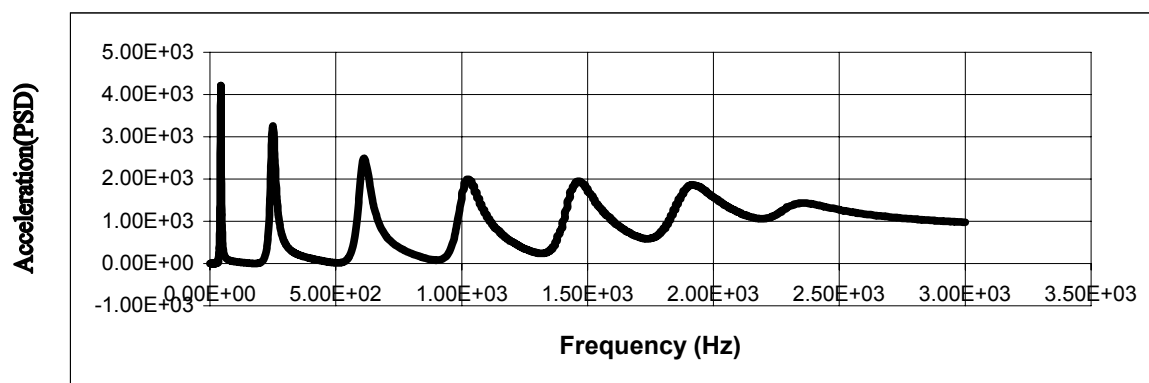
شکل ۴: پاسخ شتاب در فواصل (a) ۲۰۰ cm ، (b) ۱۵۰ cm ، (c) ۱۰۰ cm ، (d) ۵۰ cm از تکیه‌گاه

شکل (۵) شکل مش بندی شده نمونه A_1 (ترک خوردگی عرضی با عمق ۱۰، در فاصله ۲۰ سانتیمتری از تکیه گاه) را نشان میدهد.



شکل ۵: تصویر شبکه بندی شده نمونه A_1

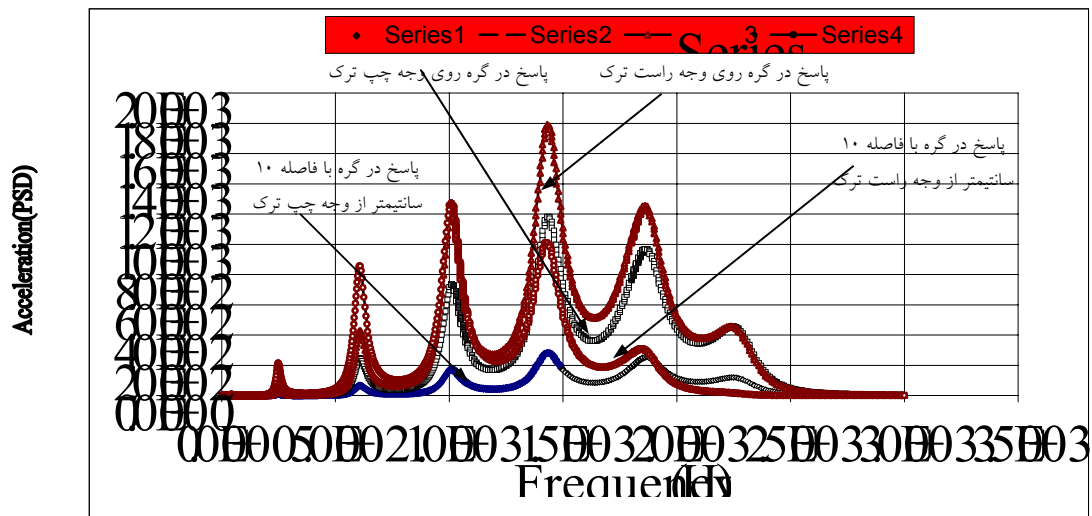
شکل (۶) پاسخ شتاب را برای نمونه A_1 در انتهای عضو نمایش میدهد. مقادیر حداکثر پاسخ نسبت به نمونه N_1 (بدون خرابی) کاهش قابل توجهی نشان میدهند که دور از انتظار نیست و آن بعلت کاهش سختی عضو بدلیل ترک خوردگی است. لیکن شکل دو نمودار بطور کلی مشابه هم هست.



شکل ۶: پاسخ شتاب در انتهای آزاد نمونه A_1

شکل (۷) پاسخ شتاب را در لبه های ترک و فواصل ۱۰ سانتیمتری از آن نشان میدهد. این نقاط گره هایی با شماره های ۱۸۷۹، ۱۸۸۴، ۲۳۴۰ و ۲۳۴۵ را شامل می شوند (شکل (۵)). گره شماره ۱۸۸۴ در وجه چپ ترک و گره شماره ۲۳۴۰ در وجه راست آن قرار دارد. البته با توجه به اینکه در کل نمونه های مدل شده، وجوه ترک با هم فاصله ای نداشته و دارای مختصات یکسان هستند، در شکل مذکور شماره های مربوط به گره های وجوه ترک برهم منطبق شده و قابل تشخیص نیستند لیکن با استفاده از روند شماره های

گره‌های اطراف، قابل تخمین زدن هستند.



شکل ۷: پاسخ شتاب در لبه‌های ترک و فواصل ۱۰ سانتیمتری از آن

طبق شکل، دامنه‌های پاسخ در نقاط سمت راست خرابی که به انتهای آزاد عضو نزدیک‌تر هستند، بیشتر است. لیکن در نقاط سمت چپ، دامنه‌ها کمتر می‌باشند. البته تمامی نقاط منحنی‌ها از این روند پیروی نمی‌کنند و در بعضی قسمت‌ها نمودارها همدیگر را قطع می‌کنند.

اگر بخواهیم پاسخ عضو را در طول آن بررسی کنیم، می‌توانیم برداشت نقاطی با فواصل یکسان در عضو را در کنار یکدیگر رسم و با یکدیگر مقایسه نماییم. اینکار منجر به نمودار سه‌بعدی خواهد شد که به جهت اختصار از ارائه آن خودداری شده است.

در این وضعیت قابل پیش بینی است که روند تغییرات پاسخ نقاط مختلف در طول عضو و در فرکانس‌های متناظر با فرکانسهای طبیعی سازه، از اشکال مودی نمونه تبعیت کنند. بعنوان مثال اگر از سمت تکیه‌گاه عضو به سمت انتهای آزاد آن پیش برویم، دامنه پاسخ در فرکانس متناسب با فرکانس طبیعی اول بتدریج افزایش می‌یابد و شکل آن کاملاً مشابه شکل مود اول ارتعاش طبیعی عضو گردد.

۵- نتیجه گیری

در مجموع نتایج حاصل از انجام آنالیز تصادفی بر روی تیر بتنی کنسولی عبارتند از:

- ۵-۱- مقادیر پاسخهای تغییر شکل و سرعت در تیر طره بتنی، تحت تحریک بار منفرد با خواص نویز سفید، در فرکانس‌های بالا نسبت به فرکانس‌های پایین‌تر در حد بسیار کم یعنی در حدود صفر هستند.
- ۵-۲- مقدار پاسخ شتاب تیر بتنی طره در ازای تحریک با نویز سفید در فرکانسهای مختلف حتی در فرکانسهای بالا بیشتر بوده، لذا برای بررسیهای دینامیکی اعضاء معیوب، ثبت واکنشهای شتاب مناسبتر از پاسخهای تغییر شکل و سرعت می باشد.

- ۳-۵- در تیر بتنی طره تحت نویز سفید با دور شدن از تکیه‌گاه، دامنه پاسخ برای تغییر مکان، سرعت و شتاب افزایش می‌یابد.
- ۴-۵- رژیم تغییرات نرمال دامنه‌های پاسخ شتاب یک تیر در طرفین خرابی (ترک) عوض شده و این موضوع به شناسایی غیر مخرب عیب سازه کمک خواهد کرد.
- ۵-۵- شناسایی عضو معیوب، همچنین مکان‌یابی موقعیت خرابی (ترک خوردگی عرضی)، بوسیله آنالیزهای تصادفی در حوزه فرکانس امکان‌پذیر است. در این راستا و برای شناسایی خرابی‌ها در عمل، تحریک سیستم می‌بایست به گونه‌ای باشد که مودهای ارتعاشی بالاتر سازه فعال شود.
- ۶-۵- پیش‌بینی می‌شود که روند تغییرات پاسخ نقاط مختلف در طول عضو و در فرکانس‌های متناظر با فرکانسهای طبیعی سازه، از اشکال مودی نمونه تبعیت کنند.

۶- مراجع

- [1] "ACI Manual of Concrete Practice (Part 3): Use of Concrete in Buildings Design, Specification, and Related Topics," *American Concrete Institute*, 1996.
- [2] LIEW, K. L. & WANG, Q., "Application of Wavelet Theory for Crack Identification in Structures," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 124, No. 2, pp. 152-157, February 1998.
- [3] "Cosmos/M User Guide (Volume 1)," *Structural Research & Analysis Corp., Version 1.75*, First Edition, June 1995.
- [۴] شاهین پر، رضا، "مطالعه رفتار دینامیکی اعضاء بتن آرمه معیوب به روش اجزاء محدود" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه، ایران، ۱۳۸۰.
- [5] BENSALAM, A., FAIRFIELD, and C.A., SIBBALD, A., "Vibration Condition Monitoring of Brickwork Columns", *Submitted to The Journal of Shock & Vibration*, U.S.A., 1996.
- [6] BENSALAM, A., FAIRFIELD, C.A., and SIBBALD, A., "Non-Destructive Evaluation of The Dynamic Response of A Brickwork Arch," *Journal of Structures and Buildings, ICE*, February 1997.
- [7] "Cosmos/M Advanced Modules (Volume 4/Part 1)," *Structural Research & Analysis Corp., Version 1.75*, First Edition, June 1995.
- [8] Clough, RAY.W., and Penzin, J., "Dynamics of Structures," *MC GRAW HILL*, Second Edition, 1993.