بررسی رفتار ارتعاشی قابها به کمک پارامترهای مودال تجربی

امیر صمد قدس[۱]، حسن حاجی کاظمی[۲]

۱- دانشجوی دکتری سازه دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد

asamadgh@yahoo.com

خلاصه

تحلیل مودال، روند شناسایی ویژگی‌های دینامیکی سازه‌ها با به کار بردن مودهای ارتعاشی آن‌ها می‌باشد. یک روش سودمند و دقیق برای ارزیابی سازه‌ها، آزمایش غیر مخرب ارتعاشی است. این روش بر این اساس است که خسارت در یک سیستم سازه‌ای منجر به تغییر ویژگی های دینامیکی آن سازه خواهد شد. در این تحقیق، آزمایشات گوناگونی به منظور بررسی ارتباط میان خسارت سازه و تغییرات در مشخصه های دینامیکی یک سیستم سازه ای انجام شده است. برای این منظور چهار قاب با ستونهایی از جنس مواد پلاستیکی فشرده و کف های چوبی با تعداد طبقات مختلف تهیه شد و اثر خسارت بر خواص دینامیکی ستونهای قابها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که با افزایش خسارت در نمونه ها، فرکانسها کاهش یافته و میرایی سازه افزایش می یابد.

کلمات کلیدی: آزمایش مودال، فرکانس، میرایی، قابهای برشی

مقدمه

با گذشت زمان بارها و عامل های گوناگون بتدریج می‌توانند موجب بروز خرابی در سازه‌ها شوند. از این‌رو بازرسی‌های منظم و ارزیابی کیفی سازه‌ها ضروری می‌باشد زیرا هرچه تشخیص خرابی ها سریع‌تر انجام شود، ایمنی و دوام آنها بیشتر تأمین و تضمین می‌گردد. زمانیکه خرابی سازه کوچک بوده و در درون سیستم سازه ای قرار دارد، تشخیص و مکان‌یابی آن با چشم میسر نیست. یک روش سودمند و دقیق برای ارزیابی غیر مخرب سازه‌ها آزمایش ارتعاشی مودال است. این روش بر اساس آن است که روی دادن خرابی در یک سیستم سازه‌ای منجر به تغییر در ویژگی های دینامیکی آن سازه خواهد شد. تحلیل مودال، روند شناسایی ویژگی‌های دینامیکی سازه‌ها با به کار بردن مودهای ارتعاشی آن‌ها می‌باشد. ویژگیهای دینامیکی مورد نظر شامل فرکانس های ویژه، میرایی و شکل مودها هستند که با کمک آزمایش مودال به دست می آیند. پاسخ سازه به نیروی دلخواه از طریق رابطه۱ که قابل استفاده برای هر سیستم دینامیکی خطی است، به دست می‌آید که در آن $h(t-\tau)$ تابع پاسخ ضربه واحد است که ویژگی‌های فرکانس، میرایی و جرم سازه را در بر می‌گیرد[1و2].

$$U(t)=\int_0^t p(\tau)h(t-\tau)d\tau \qquad (۱)$$

هنگامی که بار $p(\tau)$ نا مشخص باشد، حل این تابع اولیه بسیار دشوار می شود. با بهره جستن از تبدیل فوریه، $p(\tau)$ و $h(t-\tau)$ از حوزه زمان به حوزه فرکانسی منتقل می شوند. بنابراین پاسخ سازه در حوزه فرکانسی از ضرب ساده زیر به دست خواهد آمد[1و2].

$$U(\omega)=2\pi H(\omega)\cdot P(\omega) \qquad (۲)$$

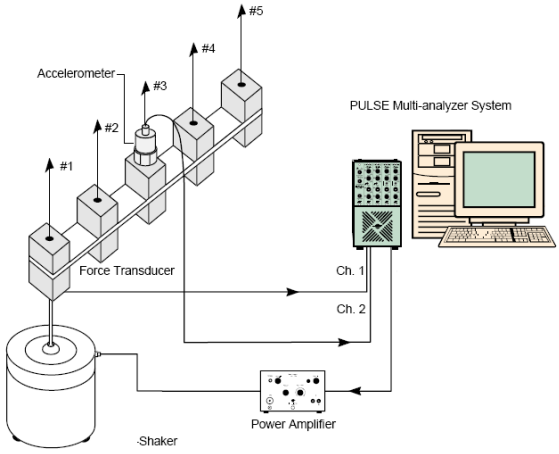
در آزمایش مودال تجربی، باید سازه را در درجه های آزادی مورد نظر با دستگاه لرزاننده الکترومغناطیسی یا چکش ضربه تحریک کرد. پاسخ سازه با حسگرهای بسیار دقیق اندازه گیری و از نسبت پاسخ به تحریک ماتریس$H(\omega)$ بر پا می شود. از آنجایی که ماتریس $H(\omega)$ و نمودارهای حاصل از آن نشان دهنده رفتار سازه می‌باشد، روابط آن برای یک سازه یک درجه آزادی تحت بار کلی به صورت زیر به دست آورده شده است[3].

$$H(\omega) = \frac{1}{-m\omega^2 + ci\omega + k} \qquad (۳)$$

نمودارهای پاسخ سازه در حوزه فرکانسی، همان نمودار H(ω) نسبت به تغییرات ω هستند. این نمودارها، FRF (Frequency Response Function) نامیده می شوند. پارامترهای تجربی مودال (فرکانس، میرایی و شکل مود) از مجموعه‌ای از اندازه‌گیری FRFها به دست می‌آیند. در دو دهه اخیر آنالیز مودال در زمینه های مهندسی هوانوردی، مهندسی خودرو و مهندسی مکانیک مورد استفاده بسیار قرار گرفته است. ملاحظات مربوط به رفتار دینامیکی سازه تحت تأثیر زلزله یا وزش باد، امروزه کاربرد آنالیز مودال را بین مهندسین سازه ضروری ساخته است. در این زمینه پژوهشگران برای ارزیابی خسارت سازه ها، روی نمونه های شبیه سازی شده سازه های واقعی از جمله قابها و پل ها، آزمایشهای بسیاری انجام داده اند[4]. برای ارزیابی افزایش کارآیی یک سازه مقاوم شده نیز از این روش استفاده شده است[5].

ابزار و روش آزمایش

برای صورت گرفتن یک آزمایش مودال نیاز به ابزاری جهت تحریک درجات آزادی و از طرف دیگر وسایلی برای اندازه‌گیری پاسخ ارتعاشی و میزان تحریک و در نهایت تحلیل‌گری به منظور استخراج اطلاعات می باشد. شکل۱ ترتیب کلی از آزمایش مودال را به صورت استاندارد نمایش می‌دهد[6].



شکل۱- ترتیب کلی آزمایش مودال

تحلیل‌گر دو کاناله به منظور اندازه‌گیری روابط ورودی و خروجی آماری سیستم‌های مکانیکی و الکتریکی مورد استفاده قرار گرفت. در آزمایش ها سیگنالهای تحریک از کانال A ارسال و سیگنال‌های پاسخ به کانال B منتقل می شدند. تحلیل‌گر قادر به اندازه‌گیری و نمایش انواع مختلفی از توابع دامنه زمانی و دامنه فرکانسی می‌باشد[7]. برای تحریک سازه‌ها از چکش ضربه استفاده شد. چکش ضربه با اندازه‌های متفاوت، نیروی ضربه‌ای متناسب با سازه مورد نظر را پدید می‌آورد. برای انجام این آزمایش بر روی سازه‌های واقعی تحریک سازه بر اساس بارگذاری خاص آن سازه صورت می‌پذیرد. به عنوان نمونه تحریک پلها توسط عبور وسیله نقلیه از آن و برای سدها، ضربه حاصل از برخورد موج آب با بدنه می‌باشد. پاسخ های سازه توسط شتاب سنج ها که قابلیت اندازه‌گیری در سه جهت را دارند و توسط آهن‌ربای مخصوص یا پیچ به سازه متصل می‌شوند، دریافت شد. تحلیل نهایی نتایج در نرم افزار STAR صورت گرفت. مهمترین قابلیت این نرم‌افزار به دست آوردن فرکانس‌های طبیعی، میرایی و شکل مودهای سازه مورد آزمایش می‌باشد. شکل ۲ شتاب سنج، تحلیل گر و چکش ضربه استفاده شده در آزمایش ها را نشان می دهد هدف اصلی از انجام این آزمایشات به دست آوردن فرکانس طبیعی، میرایی و شکل مود می‌باشد. به این منظور بایستی مجموعه‌ای از منحنی‌های FRF اندازه‌گیری شود. بنا به هدفی که داریم، اگر بخواهیم فرکانسها و میرایی‌های سازه را تعیین کنیم، اندازه‌گیری یک درایه ماتریسی FRF کفایت می‌کند. اما اگر هدف بدست آوردن شکل مودهای سازه باشد، باید دست کم یک سطر یا یک ستون از ماتریس FRF را اندازه‌گیری کرد. بنابراین سنسور را در یک درجه آزادی ثابت قرار داده و سایر درجات آزادی توسط چکش ضربه تحریک شدند.

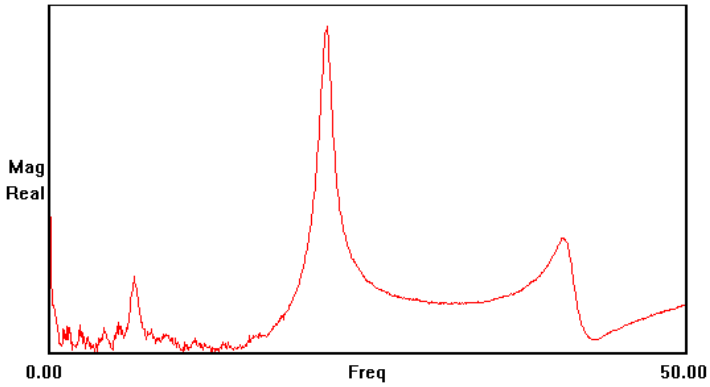
شکل۲-شتاب سنج، تحلیل گر و چکش ضربه

چگونگی آزمایش

در این تحقیق آزمایش های گوناگونی به منظور بررسی ارتباط میان تعداد طبقات مختلف سازه و خسارت سازه با تغییرات در مشخصه های دینامیکی یک سیستم سازه ای انجام شده است. برای این منظور پنج قاب با ستونهایی از جنس مواد پلاستیکی فشرده و کف های چوبی با تعداد ۳، ۵، ۷ و ۹ طبقه تهیه شد(شکل۳). با هدف تأثیر تعداد طبقات بر روی سه مشخصه فرکانس، میرایی و شکل مود، ابتدا آزمایش مودال بر روی قابها با طبقات مختلف صورت گرفت. بنابراین در تراز هر یک از طبقات یک درجه آزادی تعریف شد. سپس شتاب سنج بر روی یکی از درجات آزادی نصب شد و تحریک سازه در کلیه درجات آزادی توسط چکش ضربه صورت گرفت. نمودار های FRF و Coherence به کمک دستگاه تحلیل گر دو کاناله اندازه گیری شد. سپس نمودار ها از دستگاه تحلیل گر به نرم افزار STAR منتقل شده و با همسان سازی نمودارها پارامترهای مودال استخراج شدند. شکل ۳ قابهای مورد آزمایش شده را نشان می دهد.

شکل۳-نمونه های آزمایشگاهی

در شکل۴ نمونه ای از نمودارهایFRF برای قاب هفت طبقه ملاحظه می‌شود. همانطور که مشاهده می‌گردد، نمودارها عاری از اغتشاش می‌باشند و سه قله موجود در نمودارها بیانگر سه مود اول حرکت ارتعاشی قابها می‌باشد که به راحتی از یکدیگر قابل تفکیکند.



شکل۴-نمودارFRF قاب هفت طبقه

همانطور که بیان شد، یک روش سودمند و دقیق برای ارزیابی سازه‌ها آزمایش غیر مخرب ارتعاشی است. این روش بر این اساس است که خسارت در یک سیستم سازه‌ای منجر به تغییر ویژگی های دینامیکی آن سازه خواهد شد. برای بررسی اثر خسارت بر روی پارامترهای مودال، قابها به صورت تدریجی و در گامهای مختلف مورد خسارت قرار گرفتند که این امر با بریدن ستونها در بین درجه آزادی های مشخص همراه بود. بنابراین ابتدا قاب بدون خسارت مورد آزمایش ارتعاشی قرار گرفت و نتایج آن ثبت شد. سپس در سه گام جداگانه خسارت صورت داده شد که بین هر گام آزمایش ارتعاشی انجام شد و پارامترهای دینامیکی قاب که همان فرکانس‌ها، میرایی‌ها و شکل مود سازه ها بودند، تعیین شدند. شکل ۵، درجه های آزادی قاب و نحوه اعمال خسارت را نشان می دهد.

شکل۵-محل درجه های آزادی قاب و نحوه اعمال خسارت

نتایج آزمایش ها

فرکانسها و میرایی های مودهای مختلف را در هر گام می‌توان با تحریک یک درجه آزادی دلخواه و دریافت پاسخ در همان درجه آزادی برای کل سازه به دست آورد. در صورتیکه برای ترسیم شکل مود بایستی کلیه درجات آزادی حداقل یک بار تحریک شود. جدول ۱ فرکانسهای سه مود اول را برای قابها با طبقات مختلف را نشان می دهد. همانطور که از نتایج مشخص است با افزایش ارتفاع قابها فرکانسهای طبیعی سازه کاهش یافته است و یا به عبارت دیگر دوره تناوب آنها افزایش می یابد.

جدول۱- فرکانسهای سه مود اول برای قابها با طبقات مختلف

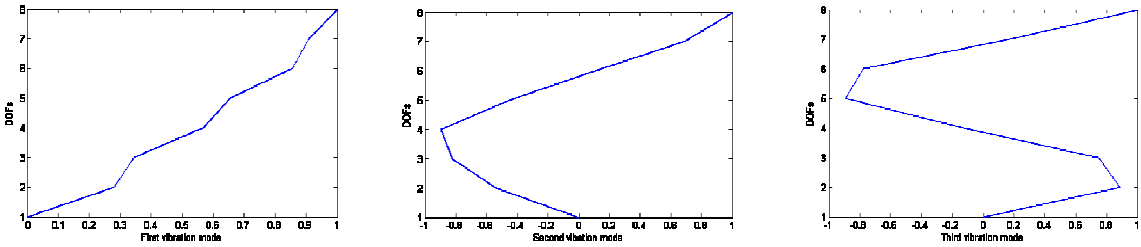
تعداد طبقه	3	5	7	9
ωمود اول(Hz)	17.71	8.88	6.65	5.53
ωمود دوم(Hz)	66.88	30.48	22.73	17.66
ωمود سوم(Hz)	141	52.93	40.51	32.23

میرایی سازه موجب استهلاک انرژی جنبشی ارتعاشی سیستم بنا به مکانیسم های مختلفی می شود. البته تعیین ضریب میرایی به سادگی ممکن نیست، زیرا مکانیسم های اساسی اتلاف انرژی در بیشتر سیستم های واقعی به ندرت به طور کامل شناخته شده اند. بنابراین میرایی سازه که به کمک آزمایش مودال بدست می آید، کلیه مکانیسم های موجود را لحاظ می کند. جدول ۲ مقادیر به دست آمده نسبت میرایی مود اول را از آزمایش ها برای قابها با تعداد طبقات مختلف ارائه می دهد.

جدول۲- میرایی مود اول برای قابها با طبقات مختلف

تعداد طبقه	3	5	7	9
ζ(٪)	5.29	6.14	4.8	5.75

شکل مودi ام از وصل کردن قله‌های مود i ام از نمودارهای FRF به یکدیگر به دست می‌آید. با همسان‌سازی نمودارهای FRF با نرم‌افزار STAR، سه شکل مود اول برای کلیه قابها ترسیم شد. شکل ۶ به عنوان نمونه سه شکل مود اول قاب هفت طبقه را نشان می دهد.



شکل۶-سه شکل مود اول قاب هفت طبقه

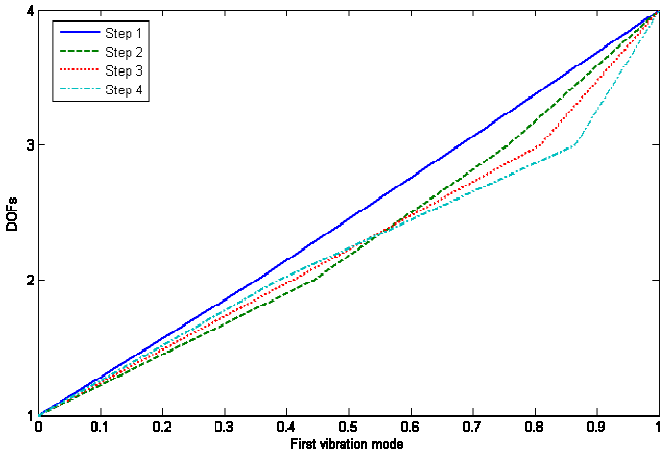
همانطور که بیان شد آزمایش هایی به منظور بررسی ارتباط میان خسارت سازه و تغییرات در مشخصه های دینامیکی یک سیستم سازه ای انجام شد. به عنوان نمونه ایجاد خسارت توسط بریدن ستونها در بین درجه آزادی های دو و سه برای قاب سه طبقه صورت گرفت. میزان طول های بریده شده و مشخصه های دینامیکی بدست آمده در گامهای مختلف خسارت در جدول ۳، برای قاب سه طبقه ارائه شده است. در جدول ۳ گام L0، گام بدون خسارت است و در گامهای L2,L1و L3 ستونها به صورت متقارن از دو کناره ها به میزان ۳،۲ و ۵ سانتیمتر بریده شدند.

جدول ۳-مقادیر فرکانسها و میرایی برای قاب سه طبقه در گامهای مختلف خسارت

گامهای خسارت	L_0	L_1	L_2	L_3
ω_1(Hz)	17.7	17.52	17.3	17.16
ω_2(Hz)	66.88	66.4	66.2	64.18
ω_3(Hz)	141	139.9	138	136.2
ζ(%)	5.29	5.4	5.48	5.54

با بررسی تغییرات فراکانسها و میرایی در گام های مختلف به وضوح مشخص است که با بالا رفتن خسارت، مقدار فرکانسها کاهش و نسبت های میرایی از خود افزایش نشان داده‌اند.

با هدف بررسی تغییرات شکل مود به علت ایجاد خسارت به سازه، سه شکل مود اول قابها در گام‌های مختلف خسارت بر روی هم قرار داده شد. شکل ۷ تغییرات شکل مود اول قاب سه طبقه را در گام‌های مختلف خسارت نشان می دهد. همانطور که در نمودارها مشخص است، شکل مودها در یک نقطه که بین درجه آزادی دو و سه می باشد یعنی همان محل خسارت همدیگر را قطع نموده اند.



شکل ۷-تغییرات شکل مود اول قاب سه طبقه در گام های مختلف خسارت

نتیجه‌گیری

به منظور بررسی ارتباط میان ارتفاع سازه و خسارت و تغییرات در مشخصه های دینامیکی یک سیستم سازه ای، چهار عدد قاب با تعداد طبقه های مختلف مورد آزمایش‌ارتعاشی قرار گرفتند. با افزایش ارتفاع قابها فرکانسهای طبیعی سازه کاهش یافته و یا به عبارت دیگر دوره تناوب آنها افزایش می یابد. با ایجاد خسارت در نمونه ها فرکانس ها کاهش یافتند که این افت فرکانس در مودهای بالاتر بیشتر بود. نسبت میرایی قابها با بالا رفتن خسارت از خود افزایش نشان داد. نتیجه حاصل از تغییرات شکل مودها در گام‌های مختلف خسارت، نشان از قطع کردن شکل مودها در ناحیه خرابی قابها داشت. بنابراین می‌توان به کمک تغییرات شکل مود محدوده خسارت دیده در قابها را شناسایی کرد.

مراجع

1. Lynch, J. P., (Fall Semester 2004-2005) CEE810(CEE619)-Advanced Structural Dynamics and Smart Structures (3 Credits), Michigan University.
2. Clough ,R. , Penzin ,J. , (1993) Dynamic of Structures, Mc Graw-Hill Inc.
3. Schwarz, B. J., and Richardson, M. H., (1999) Experimental Modal Analysis, CSI Reliability Week.
4. Peeters, B., Abdel Wahab, M., De Roeck, G., (1996) Evaluation of structural damage by dynamic system identification", Proceedings of ISMA 21, the 21th International Seminar on Modal Analysis,Belgium.
5. Ibarra, J., Bonfiglioli, B., and Pascale, G., (2001) Assessment of reinforced concrete beams damaged and repaired with externally bonded FRP sheets", FinalReport_Jorge1100, Univ. of Bologna, Bologna, Italy.
6. The Fundamentals of Modal Testing, Application Note 243-3, Agilent Technologies.
7. Dual Channel Signal Analyzer Type 2034, (1993) Instruction, Manual, Bruel & Kjaer.