

تحلیل مودال و غیرخطی تیرهای بتنی ترک خورده و مدل سازی اجزاء محدود برای ارزیابی خسارت

علیرضا قاری قرآن^{۱*}، فرهاد دانشجو^۲

۱- دانشگاه اصفهان، دانشکده حمل و نقل، گروه راه آهن

۲- دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده عمران و محیط زیست، گروه سازه

gharighoran@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۸/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۶/۱۵

چکیده - برای بررسی نظری و عملی تأثیر افزایش خسارت بر مشخصات دینامیکی سازه‌های بتنی که هدف اصلی این پژوهش است، می‌توان مشخصات دینامیکی سازه مانند بسامدهای طبیعی و شکل‌های مودی را با استفاده از مدل تحلیلی نرم‌افزاری که توانایی ارزیابی سامانه با وجود ترک، به‌ویژه ترک‌های خمشی را داشته باشد، به‌دست آورد. در این پژوهش برای دستیابی به این مدل، نمونه‌های آزمایشگاهی در آزمایشگاه با مدل تحلیلی اجزاء محدود مناسب، مدل‌سازی و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. این نمونه‌ها شامل تیرهای بتنی مسلح و پیش‌تندیده‌ای است که در آزمایشگاه ساخته شده است. در این مقاله برای آشنایی با نکات خاص مربوط به تحلیل استاتیکی غیرخطی و تحلیل دینامیکی (مودال) برای اعضای بتن‌آرمه خسارت‌دیده، چگونگی مدل‌سازی تحلیلی یکی از این نمونه‌ها نشان داده شده است. در این پژوهش، مدل‌سازی اجزاء محدود با دو پیچیدگی همراه شده است؛ نخست، ماهیت مدل‌سازی ماده‌ای مانند بتن است که با وجود ترک‌خوردگی و ساختار حاکم بر شکست بتن از یک روند غیرخطی تبعیت می‌کند و امری پیچیده و حساس است؛ دوم، رفتار چندگانه بتن و فولاد به‌ویژه در کنار هم، بر دشواری مدل‌سازی افزوده و نیاز به رعایت بسیار دقیق نکات را ایجاد می‌کند. این مطالعه نکات ویژه‌ای دارد که ارائه آن‌ها طی این مقاله می‌تواند برای مطالعات مشابه مفید باشد؛ بنابراین نخست نرم‌افزار اشاره شده معرفی و موارد لازم و مهم برای استفاده از آن گفته خواهد شد و سپس روند مدل‌سازی عضو بتن‌آرمه و مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با آزمایش، ارائه خواهد شد.

واژگان کلیدی: تحلیل مودال، تحلیل غیر خطی، تیر بتنی، ترک، اجزاء محدود، ارزیابی خسارت، پیش‌تندگی

۱- مقدمه

دیگری، غیرخطی ماده است که این نوع مسائل ممکن است در اثر وجود یک رابطه غیرخطی بین تنش و کرنش مواد به وجود آید (در این مواد تنش تابع غیرخطی از کرنش است). بتن از این نوع مواد است. در سازه‌های بتن‌آرمه، هر دو ماده بتن و فولاد، رفتاری غیرخطی دارند. برای ساخت مدل

غیرخطی شدن یک مسئله را می‌توان به دو شکل تعریف کرد؛ یکی غیرخطی شدن هندسی که این نوع دربرگیرنده تغییرات هندسه سازه است. در این نوع مسائل، ماتریس سختی سازه تابعی از بردار تغییر مکان‌ها و مشتقات آن است.

جابه جایی ایجاد شده در منحنی شکل مودی سازه، تشخیص دهند [۷]. طی مطالعه‌ای، به وسیله‌ی نحوی و جباری روشی طراحی کردند که در آن، پیدایش ترک در تیرها با روش های آزمایشگاهی آنالیز مودال و همچنین مدل تحلیلی اجزاء محدود به هنگام شده تشخیص داده می شود و اندازه ترک نیز مشخص می شود [۸].

افزون بر این تحقیقات، نگارندگان این مقاله نیز برای تشخیص و شناسایی اشکال سازه‌ها، مطالعات گسترده‌ای روی نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل تحلیلی آن‌ها انجام دادند که نتایج آن‌ها در مراجع [۹-۱۲] آمده است.

۲- چگونگی مدل سازی

نکته بسیار مهمی که در مدل سازی اجزاء محدود بتن آرمه با هر نرم افزار باید به آن پرداخت، نحوه وارد شدن مسئله ترک خوردگی المان‌ها در روند حل است؛ چرا که غیرهمگن و غیرایزوتروپیک بودن بتن به پیچیدگی حل می افزاید. بسیاری از تحلیل‌های اولیه اجزاء محدود اعضای بتن آرمه، ترک خوردگی را با استفاده از مدل‌های از پیش تعریف شده برای ترک خوردگی در محاسبات وارد می ساختند. با چنین نگرشی، در هر مرحله از بارگذاری، هندسه المان‌ها تغییر می کند؛ بنابراین این دسته از آنالیزها وقت گیر و محدود است [۱۳]. مدل دیگری که در آنالیزهای اجزاء محدود به کار می رود، مدلی است که هاله‌ای از ترک خوردگی را در نظر می گیرد. این مدل، بتن ترک خورده را به صورت یک ماده اورتوتروپیک در نظر می گیرد. به این معنا که پس از ترک خوردن المان، مدول الاستیسیته را در راستای عمود بر ترک ایجاد شده در آن المان، صفر در نظر می گیرد [۱۳]. روش استفاده شده در این پژوهش، روش دوم است.

تحلیلی در این پژوهش از برنامه ANSYS استفاده شده است [۱]. در این برنامه انواع مختلفی از موارد غیرخطی تعریف می شود. از بین این مواد، بتن به عنوان یک ماده غیرخطی مشخص، شناخته شده است و می توان ماده‌ای را به نام بتن در فهرست مواد غیرخطی آن معرفی کرد.

در حل یک مدل غیرخطی بتن آرمه، شاخص‌های ویژه‌ی مسئله باید متناسب با همان حل تنظیم شود. برای نمونه، فاینینگ تیری به طول ۳ متر را با نرم افزار ANSYS و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرد. نتایج نشان می دهند که تغییر مکان نهایی تیر در آزمایش و جواب مدل ANSYS، اختلاف بسیاری داشته است؛ به گونه‌ای که در آزمایش، ۴۵ میلی متر و در نرم افزار، ۲۷ میلی متر است که نمی توان از آن چشم پوشی کرد [۲].

اقدامات زیادی درباره‌ی نحوه مدل سازی و چگونگی استفاده از نرم افزارهای تحلیلی به وسیله‌ی پژوهشگران انجام شده که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می شود. دمیر و همکاران وی در پژوهش خود برای مدل سازی تیرهای ترک خورده از یک مدل اجزاء محدود سه بعدی با مواد الاستیک استفاده کردند [۳]. با هدف تشخیص خسارت در تیرها، کیان و همکاران او روشی را دنبال کردند که در آن فرمولی بر اساس تغییرات بسامد طبیعی و شکل‌های مودی ارائه شده است [۴]. مطالعات دینامیکی ناکیس روی تیرهای بتنی با شرایط تکیه‌گاهی دو سر ساده، نشان داده است که برای تشخیص ترک، به تغییرات بسامد طبیعی مود اول و دوم سازه که در اثر ایجاد خسارت، ایجاد شده نیاز است [۵]. ساودرا و کوتینو مدل اجزاء محدودی برای ارزیابی پاسخ دینامیکی تیر ترک خورده در شرایط تکیه‌گاهی آزاد تحت بارهای هارمونیک ارائه دادند [۶]. دیلنا و موراسی در مطالعات خود روی یک تیر توانستند با استفاده از مدل تحلیلی، ترک ایجاد شده روی تیر را با کمک

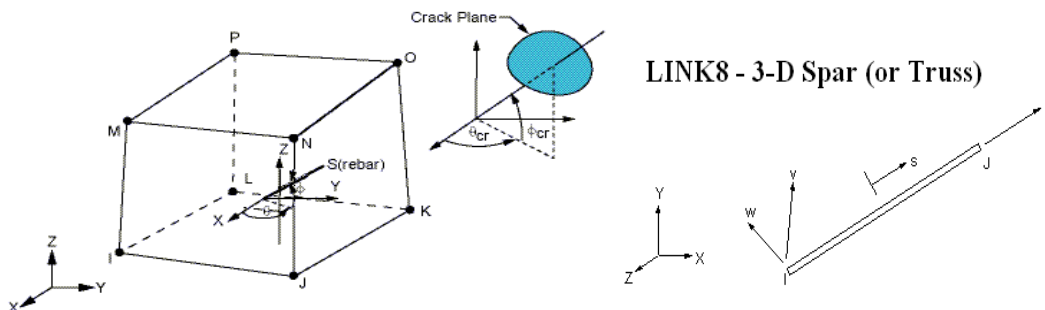
۱-۲- مدل سازی بتن آرمه به دو روش

در نرم‌افزار ANSYS، المان‌های SOLID45 و SOLID65 تنها المان‌هایی است که می‌تواند قطعات بتنی را مدل‌سازی کند. المان SOLID45 نمی‌تواند ترک‌خوردگی و خردشدگی بتن را تحلیل کند و مدل‌سازی آرماتور نیز با آن امکان‌پذیر نیست. اما المان SOLID65، یک المان سه‌بعدی است که برای مدل‌سازی بتن با (یا بدون) میلگرد به کار می‌رود. این المان می‌تواند ترک‌خوردگی بتن در ناحیه کششی و خردشدگی آن در نواحی فشاری را نیز مدل کند [۱]. این المان با هشت گره تعریف می‌شود که هر گره، سه درجه آزادی حرکتی در ۳ راستای متعامد x ، y و z دارد. در شکل ۱ نمای کلی این المان نشان داده شده است. المان SOLID65، هر دو نوع مسئله غیرخطی هندسی و ماده را دربر می‌گیرد. در این المان، در هر سه راستای دلخواه می‌توان میلگرد تعریف کرد.

همان‌گونه که اشاره شد، در المان SOLID65، آرماتور در هر سه راستای مختلف متعامد (در دستگاه محلی المان) تعریف می‌شود. این مدل که به مدل Smeard (هاله) معروف است و هاله‌ای از آرماتور را به صورت یکنواخت در همه‌ی حجم بتن در نظر می‌گیرد، دو ایراد کلی دارد. نخست، آنکه برای آرماتورها موقعیت مشخصی در نظر نمی‌گیرد، بلکه تنها درصدی از حجم المان را در راستای معرفی شده به آرماتور اختصاص

می‌دهد. ایراد دوم این روش آن است که بین میلگرد و بتن، چسبندگی کامل در نظر گرفته شده و به سختی می‌توان ارتباط دیگری بین آن دو در نظر گرفت (رجوع شود به مرجع [۱۶]). برای برطرف کردن این دو اشکال دو راه حل کلی وجود دارد که منجر به ایجاد دو روش متفاوت برای مدل‌سازی سازه‌های بتن آرمه می‌شود. اولین راه حل آن است که شبکه‌بندی مدل در نواحی اطراف آرماتورها ریزتر شود. این کار در واقع سبب می‌شود که در آن نواحی، حجم‌های ریزتری با نسبت زیاد آرماتور وجود داشته باشد. به عبارت بهتر می‌توان گفت که آرماتور با المان SOLID65 مدل شده است (المانی که درصد بالایی از حجم آن در راستای آرماتور از جنس فولاد است). این روش به وسیله‌ی مرجع [۱۶] استفاده شده است.

راه حل دوم آن است که آرماتورها با المان LINK8 مدل شوند. این روش، توصیه راهنمای نرم‌افزار نیز است [۱]. این روش، نسبت به روش قبل مزایای چشم‌گیری دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: سهولت بیشتر مدل‌سازی، برقراری ارتباط ساده بین گره‌های میلگرد و بتن به هر شکل دلخواه، زمان کمتر آنالیز مدل‌های ساخته شده با این روش و بالاخره این امکان که آرماتور دقیقاً در محل خود نسبت به مقطع، مدل شود.



شکل (۱) شمای کلی از مشخصات المان SOLID65 و نحوه قرارگیری آرماتور [۱۲۷]



شکل (۲) نمایش بارگذاری فشاری تعریف شده برای مدل کردن

پیش تنیدگی در تیر بررسی شده

۳- تحلیل مودال

چون هدف اصلی این پژوهش، بررسی تغییرات در مشخصه های دینامیکی سازه های بتنی در اثر افزایش خسارت از نوع خمشی بوده، نیاز است که در هر مرحله از بارگذاری استاتیکی و ایجاد خسارت (ترک خمشی) مشخصات دینامیکی استخراج شود. تحلیل مودال یک سازه، روشی است که با استفاده از آن می توان این مشخصات را به دست آورد. این روش در برنامه ANSYS نیز موجود است. البته این برنامه، تحلیل مودال یک سازه را به روش های مختلفی انجام می دهد که هر کدام از این روش ها توانایی های ویژه خود را دارند. برای نمونه، بعضی از روش ها امکان لحاظ کردن میرایی در محاسبات و سرانجام ارائه مشخصات دینامیکی سازه میرا را دارند و برخی این امکان را ندارند.

۱-۳- تحلیل مودال تیر خسارت دیده

آنچه در بخش قبل برای تحلیل مودال سازه ها به وسیله ANSYS گفته شد، مربوط به یک سازه با ماتریس سختی، استهلاک و جرم مشخص است. یعنی به خاطر ماهیت روش تحلیل مودال که از حل مسئله، مقادیر ویژه مشخصات دینامیکی سازه را نتیجه می دهد، در حالت عادی با توجه به خصوصیات گفته شده سازه ای که مورد تحلیل مودال قرار می گیرد، مشخصات دینامیکی به دست آمده، بیانگر سازه ای با ماتریس سختی، استهلاک و جرم ویژه است. پس در این برنامه اگر نمونه مورد مطالعه قبل از هر گونه بارگذاری، تنها تحت اثر وزن خود، آنالیز مودال شود،

برای تولید المان های خطی آرماتور، در هر دو روش باید شبکه بندی بتن به گونه ای باشد که در محل قرارگیری آرماتورهای طولی تیر، گره وجود داشته باشد. با توجه به این که نمونه مطالعه شده در این پژوهش رفتار کاملاً خمشی دارد، برای تعریف آرماتورهای عرضی، از همان نسبت حجمی استفاده شده و از به کار بردن المان LINK8 برای تعریف خاموت چشم پوشی شده است.

۲-۲- مدل سازی پیش تنیدگی

همان گونه که می دانیم، برای پیش تنیده کردن اعضای بتنی در سازه ها، از دو روش استفاده می شود: ۱- روش پیش کشیدگی^۱ و ۲- پس کشیدگی^۲. با توجه به این که نمونه آزمایش شده در این پژوهش به روش پس کشیدگی، پیش تنیده شده است، مدل تحلیلی نیز منطبق بر آن ایجاد می شود. به طور کلی، مدل سازی این نیرو در ANSYS، به دو روش امکان پذیر است. در روش اول از امکان فراهم شده در المان LINK8 می توان استفاده کرد. در جدول تعریف این المان، امکانی برای تعریف کرنش اولیه در برنامه وجود دارد. در این روش، کرنش اولیه به میلگردها اختصاص داده می شود که با واقعیت همخوانی کاملی ندارد؛ چرا که در عمل، نیروی فشاری به کل سازه وارد می شود.

روش دیگر آن است که مستقیماً مقدار مورد نظر نیروی پیش تنیدگی در دو انتهای تیر در راستای محور طولی با تعریف نیرو در گره ها به سطح مقطع، فشار وارد شود. این روش به مراتب از روش اول دقیق تر است؛ به همین دلیل در این پژوهش از روش دوم استفاده شده است. چون در انتهای تیر از ورق فلزی برای پخش نیرو استفاده شده، این نیرو با توجه به خروج از مرکزیت آن از محور تیر، مطابق شکل ۲، بین گره های موجود در مقطع عرضی پخش شده است.

1- pre-tension
2- post-tension

پوآسون ۰/۳ است. در این آزمایش‌ها از بتن با مقاومت فشاری و کششی ۲۲/۴ و ۲/۸۳ مگاپاسکال با ضریب پوآسون ۰/۲ استفاده شده است.

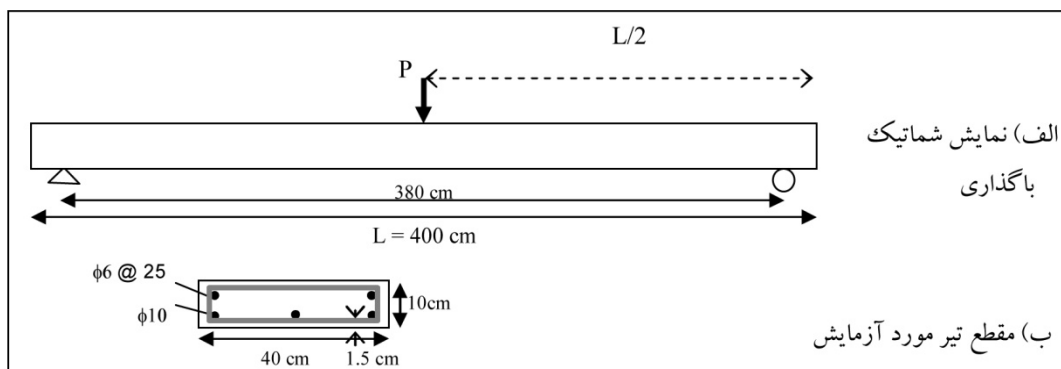
۵- مدل‌سازی تیر بتن آرمه برای تحلیل و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

به عنوان اولین مورد مدل‌سازی با ANSYS و به عبارت دیگر تلاش برای تحت یک قالب در آوردن پارامترهای نرم‌افزار برای استفاده در مدل‌سازی‌های بعدی، یکی از نمونه‌های آزمایش‌شده (تیر دو سر ساده بتن آرمه) انتخاب و مدل‌سازی آن مطابق آنچه در بخش‌های قبل اشاره شد، انجام شده است. این تیر در آزمایشگاه، بارگذاری استاتیکی شده و با افزایش میزان بار، نتایج مربوط به بار ترک‌خوردگی، بار شکست و منحنی بار-تغییر مکان آن در دو نقطه (وسط و یک‌سوم دهانه) در دست است. افزون بر آن، در هر وضعیت بارگذاری، مشخصات دینامیکی آن نیز استخراج شده است. درستی نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی برای مدل ساخته‌شده در ANSYS، گویای هماهنگی این نتایج با نتایج آزمایشگاهی است. تیر انتخاب‌شده نمونه St10P0 از میان ۱۷ نمونه تیر و دالی است که در این پژوهش آزمایش شده است.

مشخصات دینامیکی به‌دست‌آمده، مربوط به وضعیت سالم سازه است. نکته مهمی که در این مورد و در رابطه با هدف انجام این پژوهش وجود دارد، تحلیل مودال سازه در وضعیت پس از بارگذاری استاتیکی است. با افزایش میزان بار استاتیکی، سازه دچار خسارت شده و در نتیجه، سختی آن تغییر می‌کند. با این شرایط، آنالیز مودال نتایج خواهد داشت که با نتایج وضعیت اولیه متفاوت خواهند بود. به کمک نرم‌افزار، در این تحلیل می‌توان مشخصات مودال سازه خسارت‌دیده (به‌خاطر بارگذاری استاتیکی) را در هر مرحله از بارگذاری به‌دست آورد.

۴- مشخصات نمونه آزمایشگاهی (St10P0)

تیر مطالعه‌شده، یک تیر بتن آرمه با طول کلی ۴۰۰۰ میلی‌متر است. عرض و ارتفاع مقطع به ترتیب ۴۰۰ و ۱۰۰ میلی‌متر است. آرماتورهای طولی تیر در ارتفاع مقطع در دو ناحیه قرار داده شده است. یک ردیف دوتایی آرماتور در بالا و یک ردیف سه‌تایی در پایین قرار دارد. شکل کلی تیر و فولادگذاری طولی و عرضی آن در شکل ۲ دیده می‌شود. در این تیر از فولادهایی به قطر ۶ و ۱۰ میلی‌متر استفاده شده است. فولادهای طولی با قطر ۱۰ میلی‌متر با مقاومت بالا و فولادهای جان از نوع فولاد نرمه معمولی به قطر ۶ میلی‌متر با مدول الاستیسیته ۲۱۰ مگاپاسکال و ضریب



شکل (۲) ابعاد و فولادگذاری طولی و عرضی تیر بررسی‌شده و شکل کلی بارگذاری در آزمایشگاه

یکی از عوامل مؤثر در روند حل غیر خطی، اندازه المان‌های انتخاب شده است که شاید نتوان تأثیر آن را بر روند حل به صورت قطعی پیش‌بینی کرد. در این مدل‌سازی، مقطع بلوک حجمی ایجاد شده برای بتن با توجه به تأثیر گفته شده و همچنین برای آن که آرما توره‌های طولی درست در محل مورد نظر قرار گیرند (با توجه به میزان پوشش بتن در نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه)، شبکه‌بندی شده است. این بلوک در طول تیر، به خاطر ابعاد انتخاب شده شبکه در مقطع، در بیشترین حالت به اندازه ۱۰۰ میلی‌متر تقسیم‌بندی شده است. البته در برخی از دفعات حل، اندازه‌های کوچک‌تر (تا ۵۰ میلی‌متر) هم در طول تیر استفاده شده که به خاطر افزایش زمان حل تا حدود ۱۰ برابر و تأثیر نه چندان زیاد این کار در نتایج حل، همان مقدار ۱۰۰ میلی‌متر به عنوان بیشینه اندازه المان‌ها در طول تیر در نظر گرفته شده است.

همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، تیر مطالعه شده، در دو انتها روی تکیه‌گاه‌هایی نشسته است که در واقع مدل آن‌ها به صورت تکیه‌گاه‌های غلطکی و مفصلی است.

۵-۱- تحلیل استاتیکی غیر خطی

۵-۱-۱- تاریخچه بارگذاری

حساسیت حل غیرخطی به تاریخچه بارگذاری، کمتر از حساسیت آن به سایر پارامترهای مهم نیست. در یک مدل بتن آرمه، رفتار مدل، قبل و بعد از ترک‌خوردگی، تفاوت اساسی پیدا می‌کند. بنابراین رژیم بارگذاری چنین مدلی، حساسیت ویژه دارد. در بارهای کمتر از بار ترک‌خوردگی که سازه رفتار نسبتاً خطی از خود نشان می‌دهد، می‌توان گام‌های بارگذاری بلندتری داشت (گام‌هایی با مقادیر بیشتر بار). همچنین در این مراحل اولیه می‌توان تعداد زیر گام‌های کمتری نیز تعریف کرد. البته باید در تعریف

گام‌های بارگذاری به مقادیر گام‌های استفاده شده در آزمایشگاه نیز توجه داشت تا هنگام تطبیق نتایج، کمیت‌های مورد مقایسه در مقدار مشابهی از بار برای آزمایش و تحلیل، مقایسه شوند. هر چه مقدار بار در گام‌های بعدی به بارهای ترک‌خوردگی و پس از آن به بار نهایی نزدیک‌تر شود، باید تعداد گام‌ها و زیرگام‌های استفاده شده را بیشتر و بار را در مراحل بیشتری اعمال کرد؛ به بیان بهتر، باید قطعه بارهای اعمال شده کوچک‌تر باشند. با توجه به آنچه در آزمایشگاه برای گام‌های بارگذاری تیر انجام شده، در مدل ساخته شده از تیر مورد مطالعه، پس از انجام تحلیل‌های متعدد، یک تاریخچه بارگذاری متشکل از ۶ گام مطابق جدول ۱ بر تیر، اعمال شده است. در هر گام بارگذاری، تعداد زیرگام‌ها برای بارهای کمتر از بار ترک‌خوردگی، ۴ و ۵ و برای بارهای بیشتر از آن، افزایش یافته است. افزون بر این، مقدار افزایش بار در هر زیرگام برای گام‌های مختلف بارگذاری در ستون آخر جدول آمده است. در این جدول هر حالت بارگذاری با علامت اختصاری W معرفی شده است.

برای انجام تحلیل استاتیکی غیر خطی، همان‌گونه که در بخش قبل نیز گفته شد، در این پژوهش برای رسیدن به یک حل درست و نتایج تا حد امکان منطبق بر نتایج آزمایش، تعداد بسیار زیادی حل غیرخطی در حدود ۲ ساعت برای هر تحلیل با استفاده از یک رایانه با سرعت بالا انجام شده است. در تحلیل‌های اولیه، میزان بار نهایی قابل تحمل برای تیر، مقدار تغییر مکان نهایی وسط دهانه و شکل منحنی بار-تغییر مکان به دست آمده از تحلیل، تفاوت‌های چشم‌گیری با نتایج تجربی داشت. با انجام سعی و خطای زیاد و تغییر پارامترهای مختلف مؤثر بر نتایج، در هر تحلیل، منحنی بار-تغییر مکان، رسم و تا حد امکان بر منحنی به دست آمده از آزمایش

منطبق شده است.

بار نهایی: بار نهایی تیر مورد نظر در آزمایشگاه به معنی وضعیتی است که کل سطوح بتن، ترک خورده و تیر، تغییر شکل زیادی داشته باشد. معادل این وضعیت در آزمایشگاه برای نمونه بدون پیش‌تندگی، باری به میزان ۷۵۵۰ نیوتن بوده است. این شرایط در تحلیل غیرخطی انجام شده در باری برابر ۷۵۰۰ نیوتن به دست آمده است.

منحنی بار-تغییر مکان: یکی از وقت‌گیرترین مراحل اصلاح مدل ساخته شده، تطابق منحنی بار-تغییر مکان است. هر منحنی بار-تغییر مکان مربوط به یک قطعه بتن آرمه، یک ناحیه خطی دارد که به دست آوردن آن با نرم‌افزارهای غیرخطی، کار چندان دشواری نیست ولی ناحیه دوم این منحنی که معمولاً از شروع ترک خوردگی بتن و پس از تغییر شکل‌های غیرارتجاعی آرماتورها آغاز می‌شود، کاملاً غیرخطی است و دنبال کردن این قسمت با نرم‌افزار، کار بسیار دشواری است. محل‌های تغییر شیب در منحنی آزمایشگاهی با محل‌های تغییر شیب در منحنی تحلیلی، روی هم قرار نمی‌گیرند. با این وجود سعی بر آن بوده که بهترین منحنی به دست آید. در منحنی‌های شکل ۳، آخرین منحنی‌های آزمایشگاهی برای تحلیل غیرخطی در کنار منحنی‌های آزمایشگاهی برای وسط و یک سوم دهانه تیر در تعدادی از نمونه‌های St10P نشان داده شده است. اعداد مقابل حرف P، نمایانگر میزان پیش‌تندگی نمونه به واحد تن است. این منحنی‌ها مربوط به نتایج سه حالت از پنج حالت پیش‌تندگی مختلف به ترتیب به میزان‌های ۰، ۵، ۸، ۱۱/۵ و ۱۵ تن است. در این منحنی‌ها، محور افقی، تغییر مکان و محور قائم، کل بار اعمال شده در وسط دهانه تیر را نشان می‌دهد.

جدول (۱) گام‌ها و زیرگام‌های بارگذاری اعمال شده در آنالیز غیرخطی

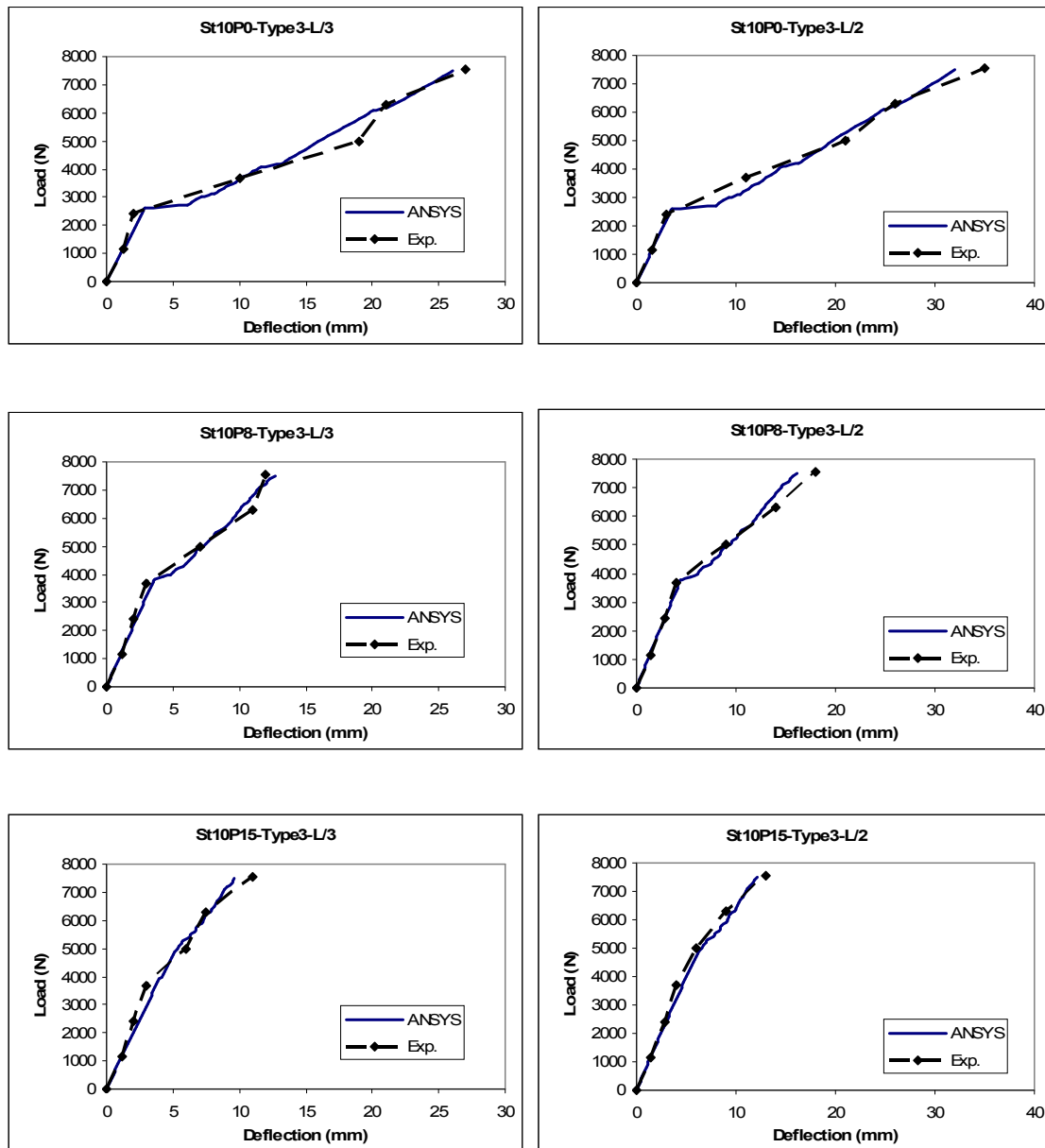
نمونه مطالعه شده

حالت بارگذاری	گام بارگذاری	مقدار بار (نیوتن)	تعداد زیرگام	میزان افزایش بار در هر زیرگام (نیوتن)
W1	۱	۱۲۰۰	۴	۳۰۰
W2	۲	۲۶۰۰	۵	۲۸۰
W3	۳	۳۶۰۰	۱۰	۱۰۰
W4	۴	۵۰۰۰	۱۴	۱۰۰
W5	۵	۶۳۰۰	۲۰	۶۵
W6	۶	۷۵۰۰	۲۴	۵۰

گاهی تحلیل غیرخطی سازه بتن آرمه تا مرحله‌ای از بارگذاری پیش‌رفته و سپس حل متوقف می‌شود. در این صورت باید دقت کرد که این مرحله از بارگذاری تنها در صورتی مشخص‌کننده بار نظیر شکست عضو است که پارامترهای مؤثر در روند انجام تحلیل، درست تعریف شده باشند. به عبارت دیگر، هر توفقی در آنالیز به معنای شکست واقعی سازه نیست. بنابراین برای آن‌که بتوان از درستی یک تحلیل اطمینان پیدا کرد، به تجربه و دقت در مدل‌سازی برای تطابق نتایج مانند کرنش‌ها و تنش‌ها در بتن و آرماتورها نیاز است.

۲-۱-۵- بررسی نتایج تحلیل

در این پژوهش برای مقایسه نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی تیر بتن آرمه با نتایج تجربی نظیر آن در آزمایشگاه، کمیت‌های مهم مختلفی، معیار این سنجش قرار گرفته است. این کمیت‌ها عبارت است از: بار نهایی قابل تحمل، منحنی بار-تغییر مکان (در نقطه وسط و یک سوم دهانه تیر) و الگوی ترک‌های ایجاد شده تا لحظه قبل از شکست تیر. برای تیر بررسی شده در این مقاله، بررسی‌های مختلف انجام شده به قرار زیر است:



شکل (۳) تطبیق منحنی‌های بار- تغییر مکان آزمایشگاهی و تحلیلی برای نمونه‌های مطالعه شده (St10P)

وجود دارد. بنابراین، این که مدل ترک‌خوردگی یک تیر به دست آمده از یک آنالیز غیرخطی تا چه حد بر مدل ترک‌خوردگی واقعی آن در آزمایشگاه منطبق است، یکی از مواردی است که می‌تواند پایه‌ی بررسی درستی آن تحلیل باشد. شکل ۴، الگوی ترک‌خوردگی تیر به دست آمده از تحلیل غیرخطی را برای نمونه بدون

الگوی ترک‌خوردگی: یکی از معیارهایی که در تعیین رفتار یک تیر بتن آرمه مؤثر است، محل ایجاد ترک‌ها و شکل ترک‌خوردگی آن تیر است. به بیان بهتر، هر نوع ترک‌خوردگی گویای نوعی رفتار است. با توجه به ضعف بتن در نواحی کششی، سه نوع ترک‌خوردگی خمشی خالص، برشی و برش در خمش در یک تیر بتن آرمه

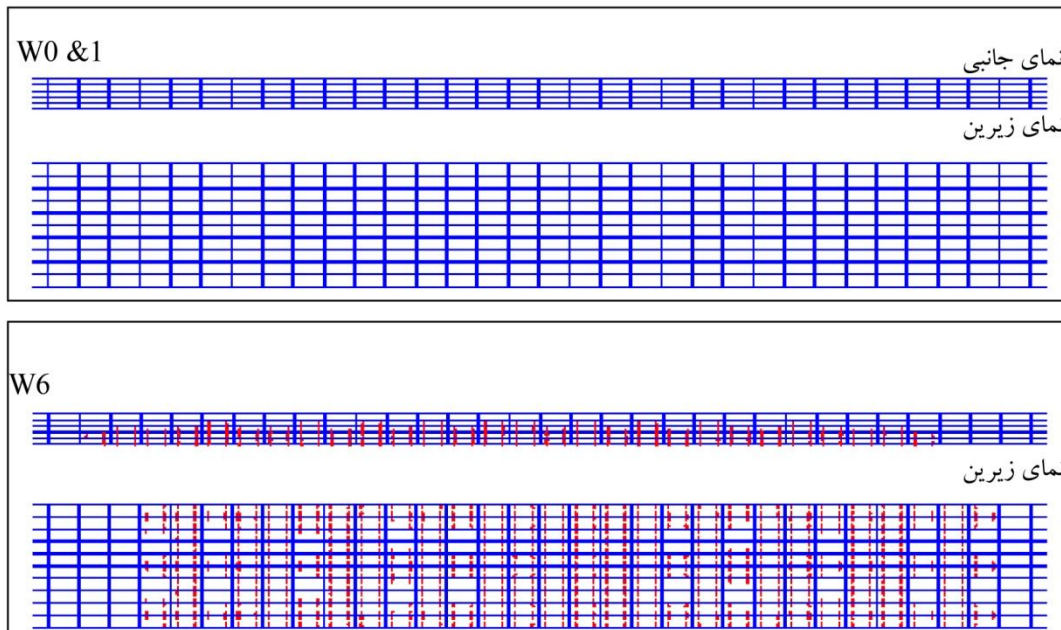
مقادیر این جدول مربوط به تیر سالم بدون پیش‌تندگی قبل از هرگونه بارگذاری استاتیکی و تنها تحت اثر وزن آن است. پس از آن‌که نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی مدل ساخته‌شده با نتایج آزمایش، تطابق داده شد، مدل نهایی در آن وضعیت، تحلیل مودال قرار گرفت که بسامد طبیعی مود اول ارتعاش به‌دست‌آمده از این تحلیل، انطباق خوبی بر نتایج آزمایش نشان می‌دهد. در مودهای بالاتر، مطابق آنچه در ستون آخر جدول (۲) آمده، اختلاف مقدار بسامد طبیعی به‌دست‌آمده از آزمایش و تحلیل، زیاد است. با توجه به این‌که مشارکت مود اول نسبت به مودهای بعدی، بیشترین مقدار را دارد [۱۲]، با تطابق نتایج مودهای اول تا سوم می‌توان مدل ساخته‌شده را مدل خوبی ارزیابی کرد؛ البته اختلاف موجود در نتایج مودهای بالاتر را می‌توان ناشی از چگونگی و شرایط حاکم بر آزمایش و خطاهای مربوط به آن دانست. به این ترتیب می‌توان گفت که مدل ساخته شده نسبت به نتایج آزمایش از جنبه‌های گوناگون تأیید شده است. شکل‌های مودی تیر در مودهای مختلف تحلیل نیز در شکل ۶ نشان داده شده است.

پیش‌تندگی در هر یک از گام‌های قبل از ترک‌خوردگی (W0 و W1) و مرحله پایان ترک‌خوردگی (W6) بارگذاری، مطابق جدول ۱ نشان می‌دهد. در شکل ۵ الگوی ترک‌خوردگی تیر در آزمایشگاه نشان داده شده است. تطابق خوب این دو الگو، گویای نزدیکی نتایج مدل ساخته‌شده با واقعیت است.

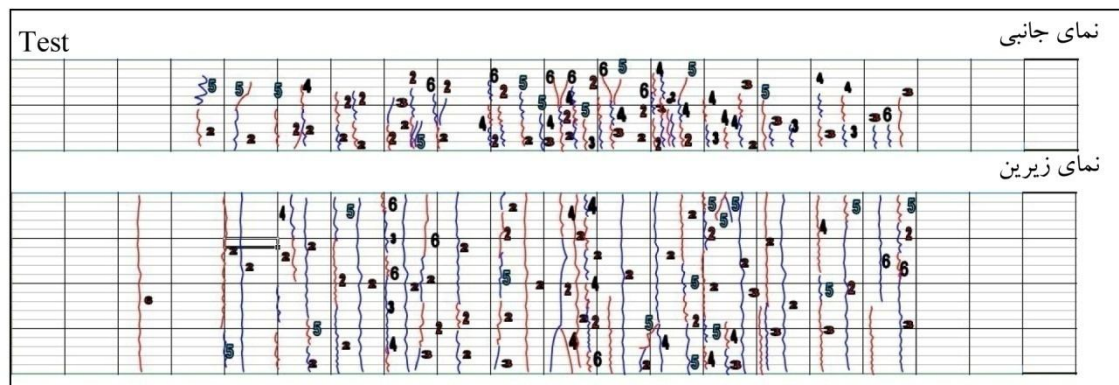
۶- تحلیل دینامیکی

۶-۱- تحلیل مودال تیر سالم

مطابق آنچه به طور مفصل در بخش (۴) بحث شد، برای انجام تحلیل دینامیکی در این پژوهش، از روش تحلیل مودال، مشخصات دینامیکی تیر به‌دست آمده است. از آن‌جا که مقدار نسبت میرایی برای نمونه‌های آزمایش‌شده در این پژوهش حدود ۲ تا ۵ درصد است، اثر میرایی بر بسامدهای طبیعی سامانه، ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. مشخصات دینامیکی به‌دست‌آمده از تحلیل مودال و آزمایش مودال تیر مطالعه‌شده، در چهار مود اول آن، انتخاب و در جدول ۲ خلاصه شده است.



شکل (۴) الگوی ترک‌های ایجادشده در تیر به‌دست‌آمده از تحلیل غیرخطی در گام‌های مختلف بارگذاری



شکل (۵) الگوی ترک‌های ایجاد شده در تیر به دست آمده از آزمایش در گام‌های مختلف بارگذاری

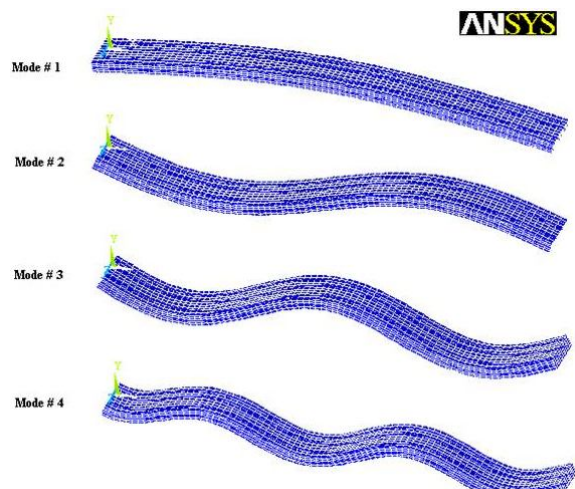
آنجا اشاره شد که در این پژوهش به دلایل مختلف از روش دوم استفاده می‌شود. در این روش، آنالیز مودال سازه بلافاصله پس از آنالیز غیرخطی در هر مرحله از بارگذاری انجام می‌شود. نمونه‌های مطالعه شده در این پژوهش با این روش بررسی شد. نتایج به دست آمده از تحلیل مودال شامل بسامدهای طبیعی چهار مود اول ارتعاشی نمونه St10P0 در حالات مختلف بارگذاری از این روش، در جدول ۳ خلاصه شده است. در این جدول، نتایج مشابه آزمایش نیز برای مقایسه ارائه شده است. تطابق مناسب نتایج به دست آمده از این تحلیل، دقت بالای این روش را نشان می‌دهد.

۷- نتیجه گیری

هدف این مقاله، پژوهش برای بررسی تأثیر خسارت بر مشخصات دینامیکی اعضای اصلی بتنی است. تحلیل مودال و آنالیز غیرخطی تیر خسارت دیده و نتایج به دست آمده از آن برای این پژوهش اهمیت ویژه‌ای دارد. چون این قسمت از تحلیل شامل دو نوع تحلیل استاتیکی غیرخطی و مودال است، این مهم بسیار زمان بر بوده است. داشتن مدلی که بیشترین حد انطباق بر واقعیت را داشته باشد در افزایش دقت نتایج و نتیجه‌گیری درست از آنها برای درک درست مسئله بسیار مهم است..

جدول (۲) مقایسه بسامدهای طبیعی تیر مطالعه شده، در آزمایش و تحلیل

شماره مود	بسامد طبیعی (Hz)		اختلاف (%)
	آزمایش	مدل تحلیلی	
اول	585/9	77/9	2/0
دوم	122/35	683/37	7/3
سوم	066/81	296/83	8/2
چهارم	61/160	82/178	3/11



شکل (۶) شکل‌های مودی ارتعاش تیر پس از تحلیل مودال مدل تأیید شده

۶-۲- تحلیل مودال تیر خسارت دیده

در بخش (۴) دو روش برای استخراج مشخصات مودال سازه بتنی خسارت دیده با نرم افزار تحلیلی، معرفی شده در

جدول (۳) بسامدهای طبیعی چهار مود اول ارتعاشی حاصل از آزمایش و تحلیل برای نمونه St10P0 در حالات مختلف خسارتی

حالت بارگذاری	بسامد طبیعی از آزمایش (Hz)				بسامد طبیعی از مدل تحلیلی (Hz)			
	مود اول	مود دوم	مود سوم	مود چهارم	مود اول	مود دوم	مود سوم	مود چهارم
W0	585/9	122/35	066/81	61/160	77/9	683/37	296/83	84/178
W1	3225/9	988/34	236/80	04/155	21/9	469/37	061/83	63/177
W2	2907/9	391/34	397/78	35/151	343/9	999/36	612/79	21/169
W3	1808/8	529/30	932/73	14/135	257/8	280/32	315/74	32/138
W4	8576/7	616/29	28/70	55/129	943/7	799/28	612/70	18/131
W5	1983/7	5/28	351/66	34/123	164/6	753/27	138/66	26/125
W6	8576/6	527/27	649/64	22/122	825/6	224/26	293/63	21/121

Computers and Structures, 79, 2001, 1451-1459.

[7] Dilena, M. and Morassi, A., "Identification of crack location in vibrating beams from change in mode positions", *Journal of Sound and Vibration*, 255(5), 2002, 915-930.

[8] Nahvi, H. and Jabbari, M., "Crack detection in beams using experimental modal data and finite element model", *International Journal of Mechanical Sciences*, 47, 2005, 1477-1497.

[۹] دانشجو، ف؛ و قاری قرآن، ع؛ "شناسایی سامانه و

ارزیابی دینامیکی آزمایشگاهی تیرهای بتنی

خسارت‌دیده در پل‌ها؛ پژوهشنامه حمل و نقل؛ سال

سوم، شماره ۲، ۱۳۸۵.

[10] Daneshjoo, F. & Gharighoran, A., "Experimental and theoretical dynamic system identification of damaged RC beams," *Electronic Journal of Structural Engineering*, 8, 2008, 29-38.

[11] Gharighoran, A., Daneshjoo, F. & Khaji, N., "Use of Ritz method for damage detection of reinforced and post-tensioned concrete beams," *Construction and Building Materials*, 23(6), 2009, 2167-2176.

[۱۲] قاری قرآن، ع؛ "ارزیابی خسارت در عرشه پل‌ها از

طریق ردیابی تغییرات در مشخصه‌های دینامیکی؛

پایان‌نامه دکتری؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ دانشکده فنی

مهندسی تهران؛ ۱۳۸۶.

[13] Kachlakev, D., Miller, T., Yim, S., and Chansawat, K., "Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates," *Final Report for Oregon Department of Transportation Research Group*, Internet File, 2001.

یکی از مهم‌ترین ارکان دست‌یابی به مدل درست، استفاده از نتایج آزمایشگاهی و تطابق آن‌ها با نتایج تحلیلی است که در این مطالعه با توجه به ایجاد ترک در نمونه‌ها، مبحث مدل‌سازی تیر ترک‌خورده و استفاده درست از نرم‌افزارهای تحلیلی مورد نظر بوده است. نتایج این پژوهش منجر به تبیین روشی برای مدل‌سازی تیرهای بتنی ترک‌خورده برای تحلیل غیرخطی و همچنین آنالیز مودال سازه شده است. این روش می‌تواند در مطالعات مشابه به ویژه در زمینه ارزیابی خسارت سازه‌ها مفید و کاربردی باشد

۸- مراجع

- [1] ANSYS User's Manual, 9th Ed., 1996, SAS IP, Inc.
- [2] Fanning, P. & Kelly O., "Smearred Crack Models of RC beams with externally bonded CFRP plates", *J. Computational Mechanics*, 26, 2000, 325-332.
- [3] Dirr, BO. and Schmalhorst, BK., "Crack depth analysis of a rotating shaft by vibration measurements", *ASME Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*, 110, 1988, 158-164
- [4] Qian, GL., Gu SN, and Jiang, JS., "The dynamic behavior and crack detection of a beam with a crack", *Journal of Sound and Vibration*, 138(2), 1990, 233-243. ICLE
- [5] Narkis, Y., "Identification of crack location in vibrating simply supported beams", *Journal of Sound and Vibration*, 172(4), 1994, 549-558.
- [6] Saavedra, PN. and Cuitino, LA., "Crack detection and vibration behavior of cracked beams",

[۱۶] سبحانی، ج؛ "پیش بینی رفتار بتن آرمه با استفاده از شبکه های مصنوعی"؛ پایان نامه کارشناسی ارشد؛ دانشگاه صنعتی اصفهان؛ ۱۳۸۰.

[14] Chen, W.F., "Plasticity in Reinforced Concrete," McGraw-Hill, New York, 1982.

[15] Samman, M.M., Biswas M., and Pandey A.K., "Employing pattern recognition for detecting cracks in a bridge model," *Modal Analysis: The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, 6, 1991, 35-44.

«Research Note»

Modal and Nonlinear Analysis of Cracked Concrete Beams and FE Modeling for Damage Assessment

A.R. Gharighoran^{1*}, F. Daneshjoo²

1- Department of Railway Engineering, Faculty of Transportation, University of Isfahan
2- Tarbiat Modares University, Engineering Department

gharighoran@yahoo.com

Abstract:

For theoretical and practical investigation of damage increase on dynamic characteristics of concrete structures can use analytical model to extract dynamic characteristics such as natural frequency and mode shape. In this research, results of experimental and finite element analytical model for various specimens were compared. These specimens include RC beams and pre-stress concrete beams that constructed in laboratory. In this paper, one of the specimens was modeled for showing how modeling cracked concrete beams and special notes related to nonlinear static analysis and modal analysis. In test case, damages are produced step-by-step applying the static load and modal characteristics of the specimen are measured via modal test immediately after loading step. However, in finite element modeling case is two complicated problems. Firstly, because concrete is a composite material, modeling of cracked concrete is very difficult. Secondly, in RC structures, both the concrete and steel have nonlinear behavior. Results of this research include peculiar notes that can be useful for other similar researches.

Keywords: Modal Analysis, Nonlinear Analysis, Beam Concrete, Crack, FE, Damage Assessment, Prestress