

اثر مقاومت بتن، مقدار میلگرد، و خسارت اولیه بر نتایج آزمایش دینامیکی مودال در تیرهای خمشی

محمدرضا اصفهانی* (استاد)

سیاهک گل نرگسی (دانشجوی دکتری)

میثم محمد حسینیان (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی عمران شریف
دردی ۲-۲۸، شماره ۳، ص. ۱۲-۳

در این نوشتار، اثر مقاومت بتن، مقدار میلگرد، و خسارت اولیه بر نتایج آزمایش مودال در تیرهای خمشی بررسی می‌شود. بدین منظور، ۸ عدد تیر بتن مسلح با ابعاد $250 \times 150 \times 2200$ میلی‌متر ساخته و آزمایش شد. نمونه‌ها از نظر مقاومت بتن، مقدار میلگرد، و خسارت اولیه با یکدیگر متفاوت بودند. آزمایش بر روی نمونه‌ها شامل مراحل استاتیکی و دینامیکی بود. فرآیند آزمایش‌ها در مراحل مختلف به صورت هم‌گام با یکدیگر تا تخریب نمونه‌ها ادامه یافت و پارامترهای دینامیکی ثبت شد. برای کشف خسارت از دو روش شکل مودهای اول و دوم و جذر مجموع مربعات شکل مودهای اول و دوم استفاده شد. نتایج نشان داد که می‌توان با کمک شکل مود دوم و نیز جذر مجموع مربعات شکل مودها، به مکان خسارت در نمونه‌ها پی برد. همچنین با تغییر در مقدار میلگرد و مقاومت بتن، تغییرات محسوس در نتایج آزمایش مودال حاصل شد.

واژگان کلیدی: آزمایش مودال، بتن مسلح، کشف خسارت، تیر خمشی، مقاومت بتن، مقدار میلگرد.

۱. مقدمه

تجزیه و تحلیل مودال، فرایند تعیین خواص ذاتی دینامیکی یک سیستم شامل بسامدهای طبیعی، ضرایب میرایی و شکل مودها، و به‌کارگیری آن‌ها برای ایجاد مدلی ریاضی از رفتار دینامیکی سیستم است. این مدل ریاضی، مدل مودال سیستم نامیده می‌شود و اطلاعات مربوط به مشخصات آن، داده‌های مودال نامیده می‌شود. تجزیه و تحلیل مودال شامل دو مبحث نظری و تجربی است. تجزیه و تحلیل مودال نظری براساس یک مدل فیزیکی از سیستمی دینامیکی شامل خواص جرم، سختی، و میرایی است و تجزیه و تحلیل مودال تجربی که آزمون مودال نیز نامیده می‌شود، روشی تجربی برای به‌دست‌آوردن مدل مودال یک سیستم است.^[۱]

مبنای نظری تجزیه و تحلیل مودال تجربی براساس رابطه‌ی بین پاسخ ارتعاش در یک نقطه‌ی سازه با تحریک در همان نقطه و یا نقاط دیگر، به‌صورت تابعی از بسامد تحریک است. این رابطه که اغلب به‌صورت یک تابع ریاضی مختلط است، تابع پاسخ بسامد یا (FRF) نامیده می‌شود.^[۲] با در نظر گرفتن ترکیبات مختلف از نقاط تحریک و پاسخ روی سازه، مجموعه‌ی کامل از FRFها تشکیل می‌شود که می‌توان آن را در قالب ماتریس FRF سیستم بیان کرد. یکی از کاربردهای تجزیه و تحلیل مودال تجربی، بازیابی عیوب سازه‌ی در مورد سازه‌هایی مانند پل‌هاست.^[۳-۸]

مبانی نظری کاربرد تجزیه و تحلیل مودال در تشخیص عیوب سازه‌ی براساس

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۲/۱۲، اصلاحیه ۱۳۸۹/۱۰/۷، پذیرش ۱۳۹۰/۲/۱۴.

esfahani@um.ac.ir
golnargesysiamak@yahoo.com
hosseinian_m@yahoo.com

این واقعیت استوار است که پاسخ دینامیکی سازه در اثر ایجاد عیوب تغییر خواهد کرد. این امر امکان تعیین آسیب روی سازه را به کمک بررسی تغییر پاسخ سازه، قبل و بعد از ایجاد آن، فراهم می‌آورد. به عبارت دیگر، تشخیص عیوب رابطه‌ی بین عیب و تغییر در پارامترهای مودال سازه را فرمول‌بندی می‌کند.^[۹] تاکنون تحقیقات فراوانی در ارتباط با آزمایش مودال انجام شده است: بررسی پارامترهای دینامیکی و ضربه‌ی در پل‌های ساخته‌شده و مقاوم‌سازی شده با FRP در نیویورک،^[۱۰،۱۱] بررسی اثرات آزمایش مودال برای دستیابی به تغییرات سختی در تیرهای بتن مسلح ترک‌خورده و ترمیم‌شده،^[۱۲،۱۳] جمع‌آوری و گزارش روش‌های محاسبه‌ی میزان خسارت بر پایه‌ی آزمایش مودال،^[۱۴] محاسبه‌ی میزان خسارت در تیرهای بتن مسلح به کمک روش‌هایی بر پایه‌ی بسامد و شکل مود،^[۱۵] بررسی رفتار لرزه‌ی طولانی‌مدت دال‌های بتن مسلح،^[۱۶] بررسی خسارت پل‌ها به کمک ارزیابی غیرمخرب با آزمایش مودال،^[۱۷] مطالعه‌ی خسارت در سازه‌ها با در نظر گرفتن میرایی به‌منزله‌ی یک پارامتر خسارتی،^[۱۸] کشف خسارت در سازه‌ها با کاربرد انرژی کرنشی از جمله تحقیقات موجود در این زمینه‌اند.^[۱۹]

بدون تردید عواملی مانند مقدار میلگرد طولی و مقاومت فشاری بتن در تغییر پارامترهای دینامیکی مودال ناشی از عوامل محیطی و خسارت مؤثرند. به علت فقدان نتایج آزمایشگاهی در این زمینه، یک برنامه‌ی آزمایشگاهی تهیه و اجرا شد. هدف اصلی از انجام این پروژه‌ی آزمایشگاهی، بررسی اثر مقاومت بتن، مقدار میلگرد،

نام‌گذاری شدند. ابعاد و نحوه‌ی آرایش میلگرد نمونه‌ها در شکل ۱ و سایر مشخصات مربوط به آن‌ها در جدول ۲ مشاهده می‌شوند. آزمایش‌های مودال شامل دو مرحله آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی است که هم‌گام با یکدیگر صورت می‌گیرند. در آزمایش‌های استاتیکی، خسارت به صورت ترک‌های برشی و خمشی توسط اعمال بار در نمونه ایجاد شد. برای اعمال بار استاتیکی، نمونه‌های تیری شکل تحت بارگذاری چهار نقطه‌یی قرار گرفتند. محل اعمال بارگذاری استاتیکی به فاصله‌ی تقریبی ۲۵ سانتی‌متر از وسط تیر است و نیرو به وسیله‌ی جک به تیرها اعمال شد. تجهیزات اعمال بار استاتیکی در شکل ۲ نشان داده شده است. برای ثبت تغییر مکان‌های نمونه در طول آزمایش‌های استاتیکی، از یک تغییر مکان‌سنج الکتریکی (LVDT)^۱ در وسط تیر و برای تعیین مقدار نیروی وارده به نمونه، از یک محفظه‌ی بار^۲ استفاده شد. این وسیله با جک هیدرولیکی در تماس و در هر لحظه قادر به اندازه‌گیری میزان نیروی وارده به نمونه بوده است. اطلاعات دریافتی از تغییر مکان‌سنج و محفظه‌ی بار، به کمک سیستم ثبت و پردازش اطلاعات^۳ دریافت شد. بعد از انجام هر مرحله‌ی

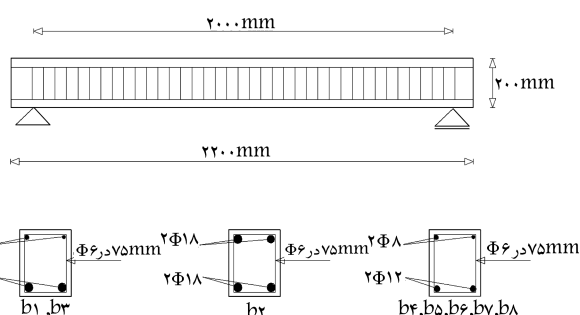
و خسارت اولیه در تیرهای بتن مسلح بر پارامترهای دینامیکی است. برای رسیدن به این هدف، از تعدادی نمونه‌ی تیری شکل با ابعاد ثابت استفاده شده است، که نمونه‌ها از نظر مقاومت بتن مصرفی و مقدار میلگرد با یکدیگر متفاوت‌اند. در ابتدا آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی در مراحل مختلف و به صورت هم‌گام با یکدیگر بر روی نمونه‌ها صورت گرفت، و در هر مرحله پارامترهای دینامیکی و تغییر مکان‌های بیشینه‌ی وسط نمونه تعیین شدند. سپس با مقایسه‌ی مقادیر تعیین شده، اثر مقاومت بتن و مقدار میلگرد بر نتایج آزمایش مودال بررسی شد. در تعدادی از نمونه‌ها خسارت اولیه ایجاد شد تا امکان تعیین محل آن‌ها با آزمایش و پارامترهای مودال بررسی شود.

۲. کار آزمایشگاهی

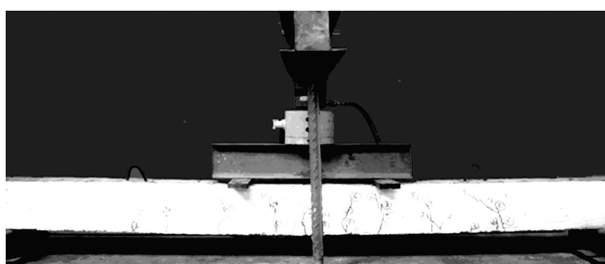
در این پژوهش، ۸ عدد تیر بتن مسلح با ابعاد ثابت $200 \times 150 \times 2200$ میلی‌متر ساخته و آزمایش شد. برای تسلیح تیرها از میلگردهای $\Phi 6$ ، $\Phi 8$ ، $\Phi 12$ و $\Phi 18$ (از میلگردهای $\Phi 6$ برای تسلیح برشی و از سایر میلگردها برای تسلیح خمشی) استفاده شد. برای بررسی اثر مقاومت بتن بر روی پارامترهای دینامیکی، از دو طرح اختلاط برای ساخت بتن با مقاومت‌های فشاری مکعبی ۲۱ و ۴۰ مگاپاسکال استفاده شد. جزئیات این دو طرح اختلاط در جدول ۱ مشاهده می‌شود. با توجه به مقدار میلگرد و مقاومت بتن مصرفی، نمونه‌های تیری شکل b_1 ، b_2 ، ... و b_8

جدول ۱. جزئیات طرح اختلاط مصالح موجود در ۱ متر مکعب بتن.

مقاومت فشاری (MPa)		مصالح (Kg)
۴۰	۲۱	
۹۱۲	۱۰۲۱	ماسه
۵۹۱	۶۴۸	بادامی
۱۶۷	۱۲۰	نخودی
۵۰۰	۳۰۰	سیمان
۱۵۰	۱۴۰	آب
۵	۰	فوق روان کننده



شکل ۱. نمونه‌های آزمایشگاهی.

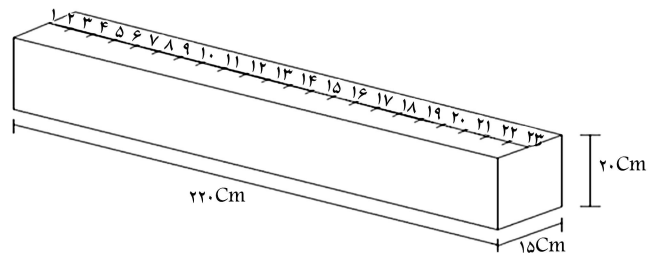


شکل ۲. تجهیزات اعمال بار استاتیکی.

جدول ۲. مشخصات نمونه‌های تیری شکل.

نوع خسارت	مساحت میلگردهای فشاری (mm^2)	مساحت میلگردهای کششی (mm^2)	مقاومت فشاری بتن (MPa)	نمونه‌ها
بدون خسارت اولیه	۱۰۱	۵۰۹	۲۱	b1
بدون خسارت اولیه	۵۰۹	۵۰۹	۲۱	b2
بدون خسارت اولیه	۱۰۱	۵۰۹	۴۰	b3
بدون خسارت اولیه	۱۰۱	۲۲۶	۴۰	b4
بدون خسارت اولیه	۱۰۱	۲۲۶	۲۱	b5
خسارت در ناحیه‌ی کششی	۱۰۱	۲۲۶	۲۱	b6
خسارت عدم چسبندگی	۱۰۱	۲۲۶	۲۱	b7
خسارت در ناحیه‌ی فشاری	۱۰۱	۲۲۶	۲۱	b8

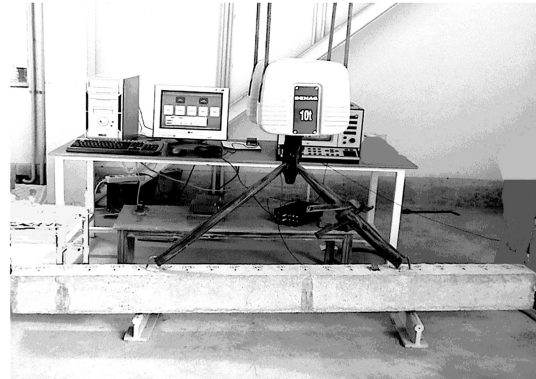
خسارت، آزمایش‌های دینامیکی در چندین مرحله انجام و بسامدهای طبیعی مربوط به موده‌های مختلف برداشت شد که در جدول‌های ۳ تا ۱۰ مشاهده می‌شوند. گام‌های مختلف خسارت در این جدول‌ها با علائم UL^0 ، UL^1 ، DL^0 و DL^1 مشخص‌اند که به ترتیب بیانگر حالات مربوط به تیر بارگذاری نشده و بدون خسارت اولیه، تیر با خسارت اولیه اما بدون بارگذاری، تیر بدون خسارت اولیه در مراحل مختلف بارگذاری، و تیر با خسارت اولیه در مراحل مختلف بارگذاری‌اند. ترک‌های ایجادشده ناشی از آزمایش‌های استاتیکی در نمونه‌ها، در شکل ۵ مشاهده می‌شوند.



شکل ۳. نمونه‌ی تیری شکل با درجات آزادی مشخص شده.

جدول ۳. بسامد موده‌های مختلف نمونه‌ی b1 برحسب (Hz).

بار استاتیکی (kN)	گام خسارت	مود اول	مود دوم	مود سوم
۰	UL^0	۱۲۸	۳۳۶	۶۲۵
۱۰	UL^1	۱۲۰	۳۲۱	۵۹۴
۱۵	UL^2	۱۱۹	۳۱۸	۵۸۷
۲۰	UL^3	۱۱۸	۳۱۴	۵۸۶
۲۵	UL^4	۱۱۶	۳۱۰	۵۸۲
۳۰	UL^5	۱۱۵	۳۰۷	۵۷۳
۳۵	UL^6	۱۱۴	۳۰۵	۵۶۵
۴۰	UL^7	۱۱۲	۲۹۷	۵۵۹
۴۵	UL^8	۱۱۰	۲۹۴	۵۵۴
۵۰	UL^9	۱۰۹	۲۹۰	۵۴۹
۵۵	UL^{10}	۱۰۶	۲۸۸	۵۳۷
۶۰	UL^{11}	۱۰۵	۲۸۷	۵۲۴
۶۲	UL^{12}	۹۵	۲۶۲	۴۷۰



شکل ۴. نمونه‌ی تیری شکل تحت آزمایش دینامیکی در حالت معلق.

جدول ۴. بسامد موده‌های مختلف نمونه‌ی b2 برحسب (Hz).

بار استاتیکی (kN)	گام خسارت	مود اول	مود دوم	مود سوم
۰	UL^0	۱۲۶	۳۴۰	۶۱۷
۱۰	UL^1	۱۱۴	۳۱۶	۵۸۹
۱۵	UL^2	۱۱۰	۲۸۷	۵۵۷
۲۰	UL^3	۱۰۸	۲۸۵	۵۴۸
۲۵	UL^4	۱۰۵	۲۸۳	۵۴۰
۳۰	UL^5	۱۰۳	۲۸۲	۵۳۷
۳۵	UL^6	۱۰۲	۲۸۱	۵۳۱
۴۰	UL^7	۱۰۱	۲۷۸	۵۲۱
۴۵	UL^8	۱۰۰	۲۷۴	۵۱۲
۵۰	UL^9	۹۹	۲۷۲	۵۰۶
۵۵	UL^{10}	۹۴	۲۶۱	۴۵۱
۶۰	UL^{11}	۸۶	۲۴۳	۴۴۵

آزمایش استاتیکی بر روی نمونه و ایجاد خسارت، باربرداری انجام شد و نمونه تحت اثر آزمایش دینامیکی قرار گرفت. آزمایش‌های استاتیکی تا جاری شدن میلگردهای کششی (در تیرهای با مقدار میلگرد کم تر از مقدار میلگرد متوازن) یا خرد شدن بتن (در تیرهای با مقدار میلگرد بیشتر از مقدار میلگرد متوازن) ادامه یافتند. همچنین معیار ایجاد خسارت برای انجام باربرداری و شروع آزمایش دینامیکی، ترک‌هایی است که در اثر اعمال بار استاتیکی بر نمونه وارد می‌شوند. تعداد این ترک‌ها در ابتدا بسیار کم و به‌سختی قابل مشاهده‌اند. لیکن با افزایش بار استاتیکی در مراحل مختلف بارگذاری، تعداد و عمق این ترک‌ها افزایش می‌یابد. برای انجام آزمایش دینامیکی، تعداد ۲۳ درجه‌ی آزادی به فاصله‌ی ۱۰۰ میلی‌متر از یکدیگر برای تیر تعیین شدند (شکل ۳).

تمام تیرها با کابل‌های ارتجاعی به‌صورت آویزان آزمایش شدند. قبلاً بسیاری از پژوهشگرها آزمایش مودال تیر در حالت آویزان را پیشنهاد کرده‌اند. [۱۳، ۱۲، ۲، ۱] پس از آویزان کردن نمونه، حسگر شتاب‌سنج بر روی درجه‌ی آزادی ۸ به‌صورت ثابت قرار داده شد و با چکش ضربه بر روی کلیه‌ی درجات آزادی، تحریک موردنظر اعمال شد. چکش ضربه و حسگر شتاب‌سنج با کابل‌هایی به تحلیل‌گر دو کاناله متصل و با اعمال ضربه بر روی هر یک از درجات آزادی، دیاگرام‌های FRF در موده‌های مختلف در مانیتور تحلیل‌گر مشاهده شدند. داده‌های به‌دست‌آمده از تحلیل‌گر به رایانه انتقال یافتند و با نرم‌افزار Star نصب‌شده بر روی آن، پارامترهای دینامیکی مختلفی از قبیل شکل مود، بسامدهای طبیعی، میرایی و... محاسبه شدند. [۲۰] نحوه‌ی تعلق نمونه در شکل ۴ نشان داده شده است.

۳. نتایج آزمایشگاهی

در این آزمایش‌ها، ابتدا نمونه‌ها بدون اعمال بار استاتیکی تحت آزمایش دینامیکی قرار گرفتند. سپس با اعمال بار استاتیکی به نمونه‌ها در گام‌های مختلف و ایجاد

جدول ۵. بسامد مودهای مختلف نمونهی b۳ برحسب (Hz).

بار استاتیکی (kN)	گام خسارت	مود اول	مود دوم	مود سوم
۰	UL ^۰	۱۴۸	۳۹۲	۷۲۴
۱۰	UL ^۱	۱۴۲	۳۸۰	۷۰۸
۱۵	UL ^۲	۱۳۹	۳۷۴	۶۹۵
۲۰	UL ^۳	۱۳۸	۳۷۱	۶۹۲
۲۵	UL ^۴	۱۳۶	۳۶۴	۶۸۱
۳۰	UL ^۵	۱۳۵	۳۶۰	۶۷۱
۳۵	UL ^۶	۱۳۴	۳۵۶	۶۶۷
۴۰	UL ^۷	۱۳۳	۳۵۵	۶۶۴
۴۵	UL ^۸	۱۳۲	۳۵۳	۶۶۲
۵۰	UL ^۹	۱۳۱	۳۵۱	۶۵۷
۵۵	UL ^{۱۰}	۱۳۰	۳۵۰	۶۶۲
۶۰	UL ^{۱۱}	۱۲۹	۳۴۹	۶۵۲
۶۵	UL ^{۱۲}	۱۲۸	۳۴۸	۶۵۱
۷۰	UL ^{۱۳}	۱۲۵	۳۴۵	۶۳۵
۷۵	UL ^{۱۴}	۱۱۰	۳۰۸	۵۶۴

جدول ۸. بسامد مودهای مختلف نمونهی b۶ بر حسب (Hz).

بار استاتیکی (kN)	گام خسارت	مود اول	مود دوم	مود سوم
۰	UL ^۰	۱۲۹	۳۴۳	۶۳۴
۰	DL ^۰	۱۰۹	۲۹۴	۵۹۳
۵	DL ^۱	۹۵	۲۶۴	۵۵۳
۱۰	DL ^۲	۹۴	۲۵۶	۵۳۷
۱۵	DL ^۳	۹۳	۲۵۵	۵۳۰
۲۰	DL ^۴	۸۸	۲۴۴	۵۰۳
۲۴	DL ^۵	۶۹	۲۱۴	۴۳۰

جدول ۹. بسامد مودهای مختلف نمونهی b۷ بر حسب (Hz).

بار استاتیکی (kN)	گام خسارت	مود اول	مود دوم	مود سوم
۰	DL ^۰	۱۲۲	۳۲۸	۵۹۷
۵	DL ^۱	۱۰۶	۳۰۴	۵۶۴
۱۰	DL ^۲	۱۰۲	۲۸۷	۵۴۰
۱۵	DL ^۳	۱۰۱	۲۸۲	۵۳۸
۲۰	DL ^۴	۹۸	۲۷۶	۵۲۵
۲۵	DL ^۵	۸۹	۲۶۶	۴۹۲
۲۶	DL ^۶	۸۰	۲۵۱	۴۹۱

جدول ۶. بسامد مودهای مختلف نمونهی b۴ بر حسب (Hz).

بار استاتیکی (kN)	گام خسارت	مود اول	مود دوم	مود سوم
۰	UL ^۰	۱۳۴	۳۶۶	۶۶۷
۱۰	UL ^۱	۱۱۲	۳۳۵	۶۲۷
۱۵	UL ^۲	۱۰۵	۳۱۴	۶۰۱
۲۰	UL ^۳	۱۰۴	۳۰۸	۵۹۰
۲۵	UL ^۴	۹۱	۲۹۱	۵۷۱
۳۴	UL ^۵	۸۵	۲۷۵	۵۴۵

جدول ۱۰. بسامد مودهای مختلف نمونهی b۸ بر حسب (Hz).

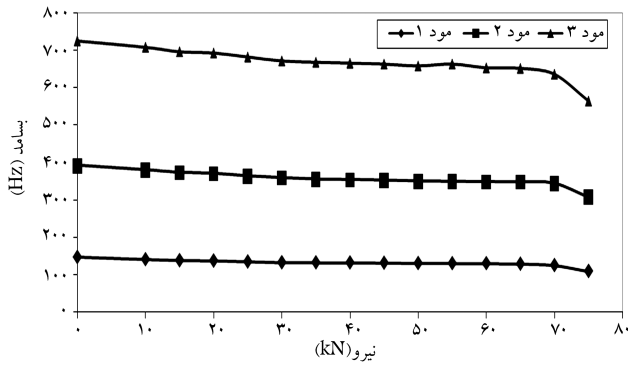
بار استاتیکی (kN)	گام خسارت	مود اول	مود دوم	مود سوم
۰	UL ^۰	۱۱۶	۳۲۱	۵۹۳
۰	DL ^۰	۱۱۵	۳۱۸	۵۹۰
۵	DL ^۱	۱۰۶	۳۰۰	۵۶۹
۱۰	DL ^۲	۹۶	۲۷۹	۵۴۷
۱۵	DL ^۳	۹۵	۲۶۸	۵۳۶
۲۰	DL ^۴	۹۳	۲۵۸	۵۲۰
۲۴	DL ^۵	۷۸	۲۴۰	۴۹۱

جدول ۷. بسامد مودهای مختلف نمونهی b۵ بر حسب (Hz).

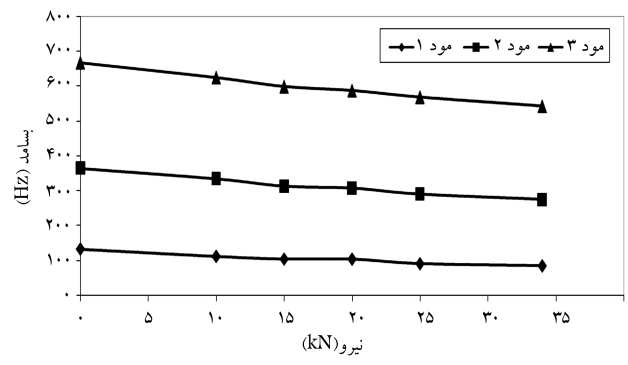
بار استاتیکی (kN)	گام خسارت	مود اول	مود دوم	مود سوم
۰	UL ^۰	۱۱۵	۳۲۶	۵۹۸
۱۰	UL ^۱	۹۸	۲۹۷	۵۵۵
۱۵	UL ^۲	۹۷	۲۹۰	۵۵۱
۲۰	UL ^۳	۹۴	۲۸۳	۵۴۴
۲۵	UL ^۴	۸۹	۲۶۴	۵۰۹
۲۹	UL ^۵	۸۰	۲۵۴	۴۹۳

۴. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی

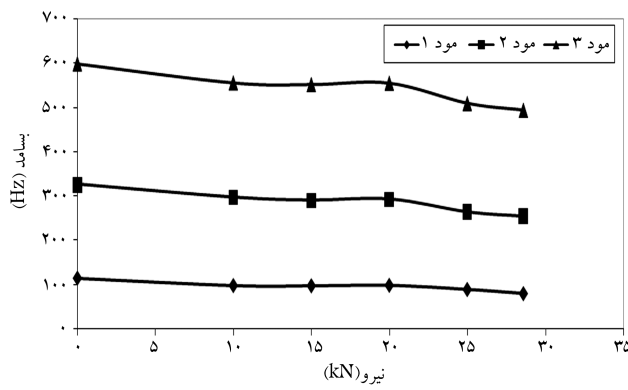
با افزایش بارگذاری و در نتیجه خسارت تیر، ممان اینرسی مؤثر و سختی خمشی مقطع کاهش می‌یابد. این امر باعث کاهش بسامد طبیعی نمونه‌ها در مودهای مختلف می‌شود (شکل‌های ۶ تا ۱۳). آفت آبی بسامد در مرحله‌ی آخر بارگذاری در برخی نمونه‌ها ناشی از تخریب ناگهانی نمونه‌ی تیری شکل پس از جاری شدن میلگرد و یا خرد شدن بتن در ناحیه‌ی فشاری است. با توجه به نمودارهای موجود در شکل‌های ۶ تا ۱۳، می‌توان به بررسی اثر مقدار میلگرد، مقاومت بتن، و خسارت اولیه بر نتایج آزمایش مودال پرداخت.



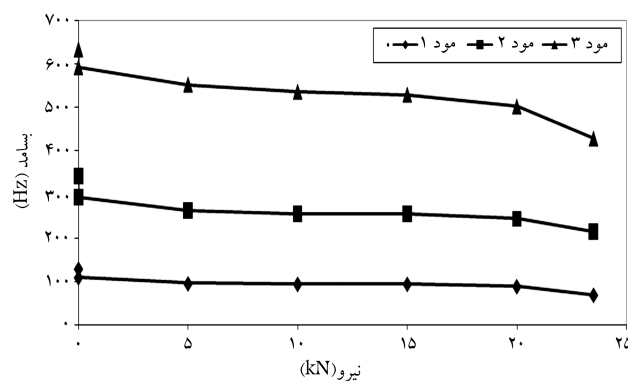
شکل ۸. بسامد نمونه‌ی b۳ در گام‌های مختلف بارگذاری.



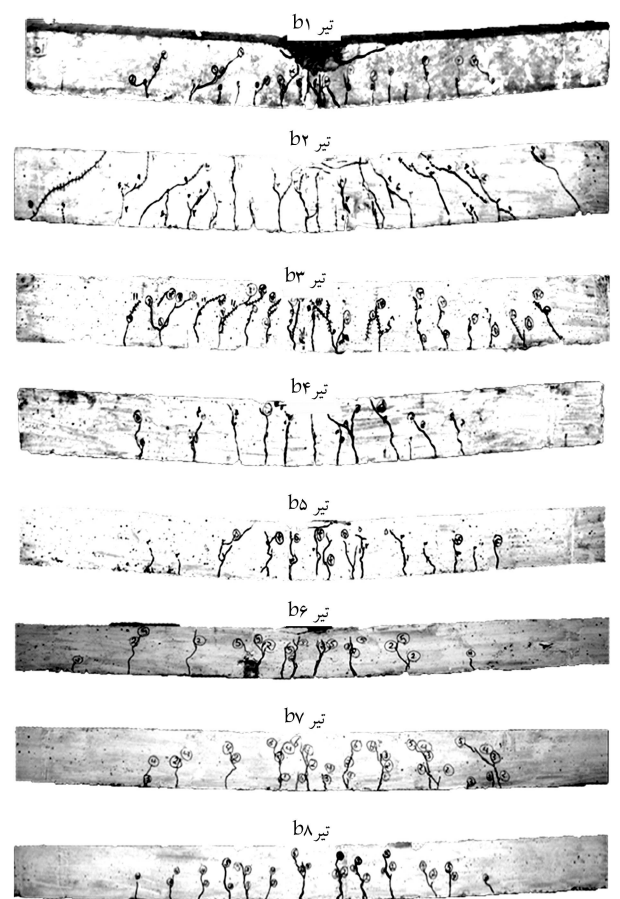
شکل ۹. بسامد نمونه‌ی b۴ در گام‌های مختلف بارگذاری.



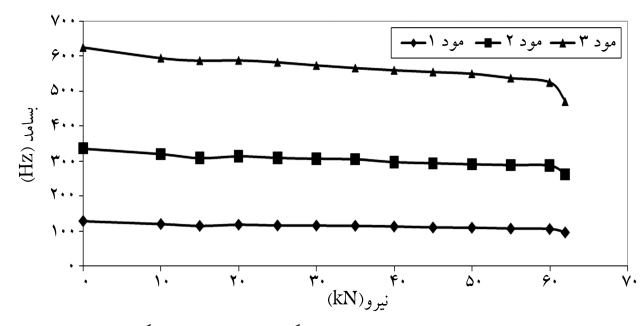
شکل ۱۰. بسامد نمونه‌ی b۵ در گام‌های مختلف بارگذاری.



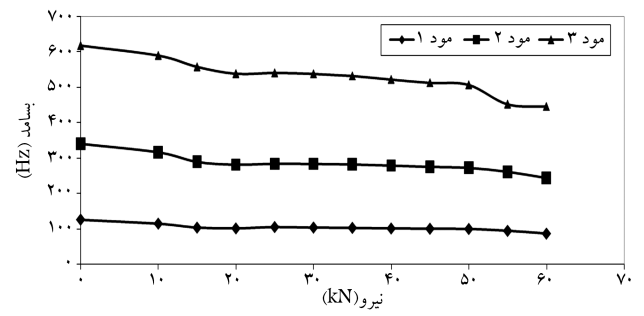
شکل ۱۱. بسامد نمونه‌ی b۶ در گام‌های مختلف بارگذاری.



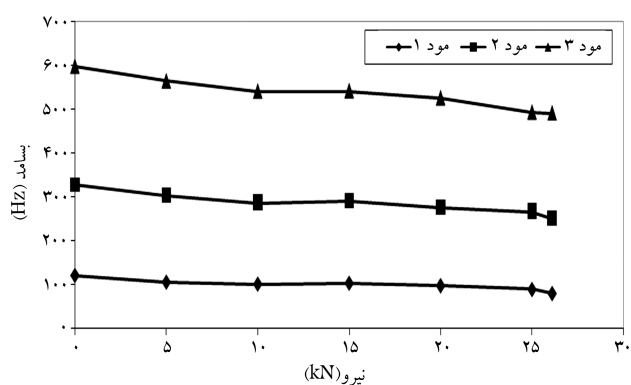
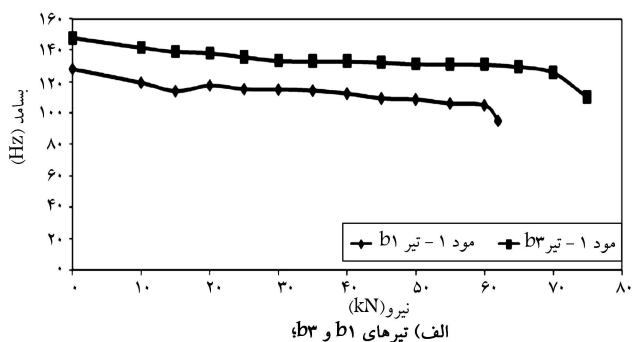
شکل ۵. نمایش ترک‌ها در نمونه‌های تبری شکل.



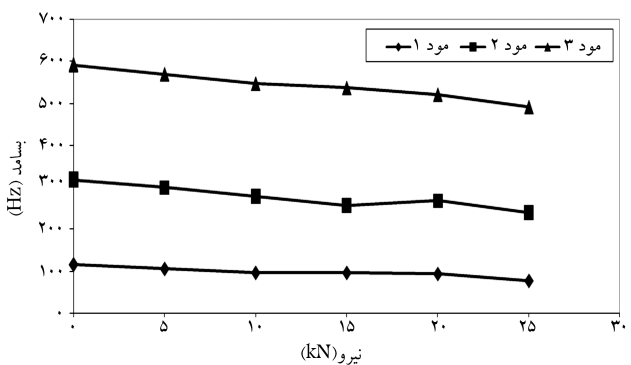
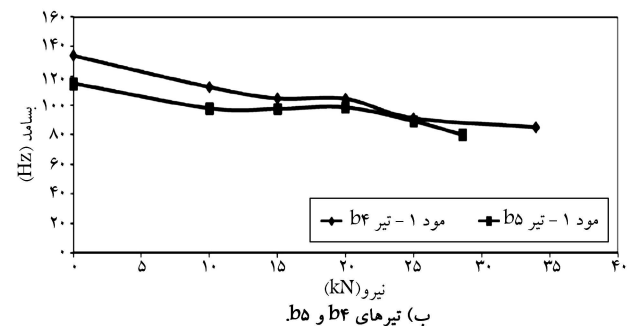
شکل ۶. بسامد نمونه‌ی b۱ در گام‌های مختلف بارگذاری.



شکل ۷. بسامد نمونه‌ی b۲ در گام‌های مختلف بارگذاری.

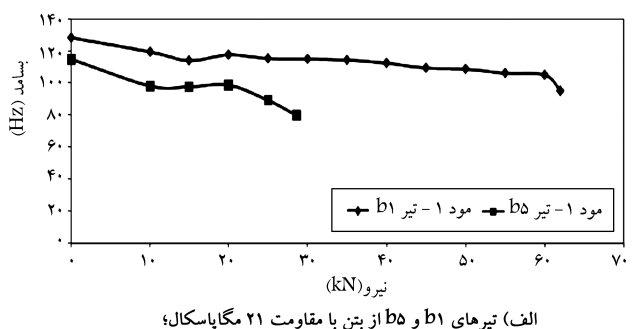


شکل ۱۲. بسامد نمونه‌ی b۷ در گام‌های مختلف بارگذاری.

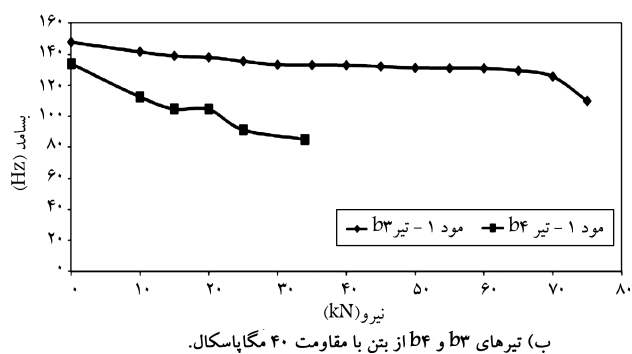


شکل ۱۳. بسامد نمونه‌ی b۸ در گام‌های مختلف بارگذاری.

شکل ۱۴. مقایسه‌ی بسامد مود اول در تیرهای دارای مقدار میلگرد مشابه و مقاومت بتن متفاوت.



شکل ۱۴. اثر مقاومت بتن و مقدار میلگرد بر نتایج آزمایش مودال یکی از اهداف این پژوهش بررسی اثر مقاومت بتن و مقدار میلگرد بر نتایج آزمایش مودال است. با تغییر این دو پارامتر در نمونه‌های مورد آزمایش، این نتایج به دست آمده است:



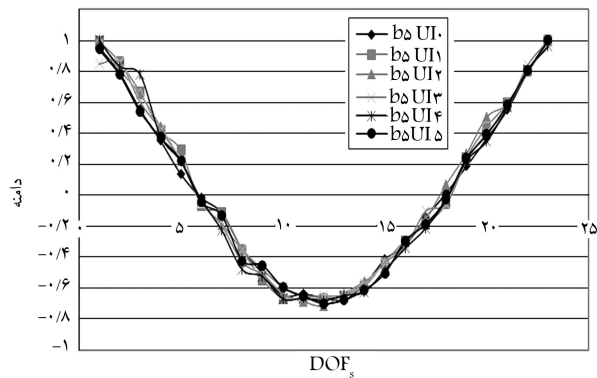
- با مقایسه‌ی بسامد مود اول تیرهای b۱ و b۳ (شکل ۱۴ الف) و نیز تیرهای b۴ و b۵ (شکل ۱۴ ب) که هر دو دارای مقدار میلگرد یکسان و مقاومت بتن متفاوت اند (تیرهای b۱ و b۵ با مقاومت ۲۱ MPa و تیرهای b۳ و b۴ با مقاومت ۴۰ MPa دارند)، مشاهده می‌شود که با افزایش مقاومت بتن از ۲۱ MPa به ۴۰ MPa، بسامد طبیعی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این افزایش برای تیرهای با آرماتور کششی بیشتر (تیرهای b۱ و b۳) به‌طور میانگین در مود اول در حدود ۱۶٪ (تفاوت بسامد دو نمونه بین ۱۴٪ در مراحل اولیه‌ی بارگذاری و ۲۶٪ در مراحل پایانی بارگذاری در مود اول است) و برای تیرهای با آرماتور کششی کم‌تر (تیرهای b۴ و b۵) به‌طور میانگین در مود اول در حدود ۸٪ (تفاوت بسامد دو نمونه بین ۱۴٪ در مراحل اولیه‌ی بارگذاری و ۶٪ در مراحل پایانی بارگذاری در مود اول است) بوده است. این گرایش برای سایر مودها نیز برقرار است.

شکل ۱۵. مقایسه‌ی بسامد مود اول در نمونه‌های با مقدار میلگرد کششی متفاوت و مقاومت بتن یکسان.

- نتایج آزمایش‌های نمونه‌های مشابه b۱ و b۲ که فقط آرماتورهای فشاری متفاوت داشتند، نشان می‌دهد که بسامد آن‌ها تفاوت قابل توجهی نداشته است.

مگا پاسکال، بسامدهای تیر b۱ با فولاد کششی 509 mm^2 به‌طور میانگین در مود اول، ۲۰٪ بیشتر از بسامدهای تیر b۵ با فولاد کششی 226 mm^2 است (این اختلاف در مراحل اولیه‌ی مود اول در حدود ۱٪ و در مراحل پایانی مود اول در حدود ۳۰٪ است که به‌طور میانگین در حدود ۲۰٪ است). در مورد تیرهای با مقاومت فشاری ۴۰ مگا پاسکال این تفاوت به‌طور میانگین در مود اول

- با توجه به شکل ۱۵، با مقایسه‌ی بسامد مود اول تیرهای b۱ و b۵ و نیز تیرهای b۳ و b۴ که هر جفت دارای مقدار میلگرد کششی متفاوت و مقاومت بتن مشابه‌اند، مشاهده می‌شود که تیرهای با مقدار میلگرد کششی بیشتر دارای بسامدهای بیشتری در مراحل مختلف‌اند. به عبارت دیگر برای بتن با مقاومت فشاری ۲۱



شکل ۱۹. مود اول نمونه‌ی b5 در گام‌های بارگذاری.

اول و دوم نشان داده و بحث خواهد شد. تیر b5 نیز به‌منزله‌ی تیر مرجع استفاده شد و هیچ‌گونه خسارت اولیه در آن ایجاد نشد. نحوه‌ی انجام آزمایش مودال بر روی نمونه‌های b5 تا b8 مشابه سایر تیرها بود. نمودارهای مربوط به شکل مودهای اول و دوم این نمونه‌ها در شکل‌های ۱۹ تا ۲۶ مشاهده می‌شوند. علائم UL^0 ، DL^0 ، DLi و ULi موجود در نمودار شکل‌های ۱۹ تا ۲۶ به‌ترتیب بیانگر حالات مربوط به تیر بارگذاری‌نشده و بدون خسارت اولیه، تیر دارای خسارت اولیه اما بدون بارگذاری، تیر بدون خسارت اولیه در مراحل مختلف بارگذاری و تیر با خسارت اولیه در مراحل مختلف بارگذاری‌اند.

۱.۲.۴. کشف خسارت با استفاده از شکل مودهای اول و دوم

با بررسی نمودارهای مربوط به شکل مود اول تیرها در شکل‌های ۱۹ تا ۲۲، می‌توان دریافت که شکل مودها تغییرات مشخصی در مراحل مختلف بارگذاری نسبت به یکدیگر ندارند، و بنابراین نمی‌توان از محل تمرکز ترک‌ها و همچنین محل خسارت اولیه بر روی تیرها، اطلاعات مناسبی به‌دست آورد. اما با بررسی نمودارهای مربوط به شکل مود دوم تیرها در شکل ۲۳ تا ۲۶ مشاهده می‌شود که در حد فاصل درجات آزادی $(DOF)^4$ ۱۳ تا ۲۰، مقدار پراکندگی در شکل مودها در مراحل مختلف دیده می‌شود که این پراکندگی می‌تواند نشانه‌ی وجود خسارت در این ناحیه باشد. همچنین با مقایسه‌ی اختلاف شکل مودهای حالات بدون بارگذاری (قبل و بعد از ایجاد خسارت اولیه) می‌توان به وجود خسارت اولیه پی برد.

۲.۲.۴. کشف خسارت با استفاده از روش جذر مجموع مربعات مودهای اول و دوم

در این بخش با روش جذر مجموع مربعات دامنه‌های چند مود به‌صورت هم‌زمان برای کشف خسارت استفاده می‌شود. در این روش، مقادیر دامنه‌ی مربوط به شکل مودهای اول و دوم در هر درجه‌ی آزادی برداشت شده و هر یک به توان ۲ رسیده است و سپس جذر مجموع مربعات مربوط به آن درجه‌ی آزادی محاسبه می‌شود. با محاسبه‌ی جذر مجموع مربعات برای تمام درجات آزادی، نمودار مربوط به آن رسم می‌شود. به‌عنوان مثال نمودار مربوط به ترکیب مودهای اول و دوم تیر b6 در شکل ۲۷ مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل، می‌توان مکان خسارت اولیه در تیر b6 را پیش‌بینی کرد. در تیر b6 (شکل ۲۷)، پراکندگی زیادی در پیرامون درجه‌ی آزادی ۱۶ (مکان سوراخ‌های ایجادشده در ناحیه‌ی کششی) در نمودار ترکیب مودها موجود است. این پراکندگی از درجه‌ی آزادی ۱۳ به‌تدریج زیاد می‌شود و در محدوده‌ی درجات آزادی ۱۴ و ۱۵ به اوج خود می‌رسد و در درجه‌ی آزادی ۱۷ به وضعیت اولیه باز می‌گردد.

حدود ۲۵٪ است (این تفاوت در مراحل اولیه در حدود ۱۰٪ و در مراحل پایانی در حدود ۳۷٪ است که این تفاوت به‌طور میانگین در حدود ۲۵٪ است). این گرایش برای سایر مودها نیز برقرار است.

۲.۴. کشف خسارت با استفاده از نتایج آزمایش مودال

در این بخش، نمونه‌های b5 تا b8 که از نظر مقدار میلگرد و مقاومت بتن، مشابه‌اند و از نظر خسارت اولیه‌ی ایجادشده (قبل از هرگونه بارگذاری) متفاوت‌اند، بررسی می‌شوند. خسارت اولیه‌ی ایجادشده در تیر b6 با توجه به شکل ۱۶، به‌صورت سوراخ‌کاری در زیر تیر (ناحیه‌ی کششی) و در مکان درجه‌ی آزادی ۱۶ به‌فاصله‌ی ۱۵۰ سانتی‌متر از سر آزاد تیر انجام گرفت. قطر، عمق، و فاصله‌ی مرکز به مرکز سوراخ‌ها به‌ترتیب برابر با ۷، ۵۰ و ۱۴ میلی‌متر بود. در تیر b8، خسارت اولیه شامل سوراخ‌هایی در ناحیه‌ی فشاری و در درجه‌ی آزادی ۱۶ بود. قطر، عمق، و فاصله‌ی مرکز به مرکز سوراخ‌ها به‌ترتیب برابر با ۷، ۵۰ و ۱۴ میلی‌متر بود. شکل ۱۷، بیانگر نحوه‌ی ایجاد خسارت اولیه در نمونه‌ی b8 است. خسارت اولیه در نمونه‌ی b7 به‌صورت ایجاد عدم چسبندگی بین بتن و آرماتور بر روی آرماتورهای کششی بود. این عدم چسبندگی با استفاده از چند لایه‌ی چسب نواری به طول ۱۰۰ میلی‌متر و در فاصله‌ی ۷۰۰ میلی‌متری از تکیه‌گاه، بر روی آرماتورهای کششی مطابق شکل ۱۸ انجام شد. بدون شک با توجه به حذف عملکرد آج آرماتور در اثر لایه‌های زیاد چسب و همچنین جلوگیری از چسبندگی بتن و آرماتور، مکانیزم پیوستگی آرماتور و بتن عملاً وجود نخواهد داشت. این موضوع در نمودارهای شکل مود دوم و ترکیب مودهای



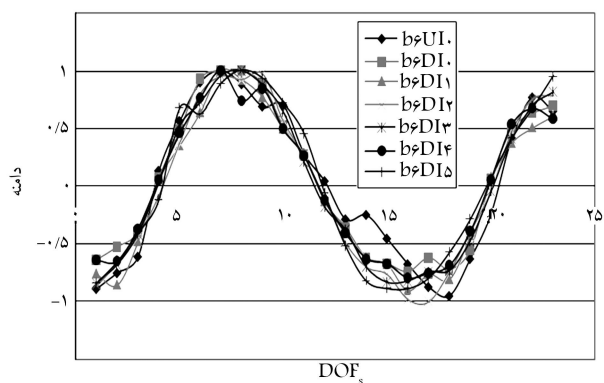
شکل ۱۶. خسارت تحتانی تیر b6.



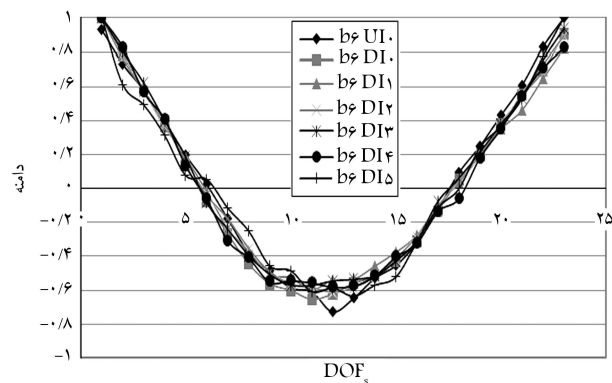
شکل ۱۷. خسارت فوقانی تیر b8.



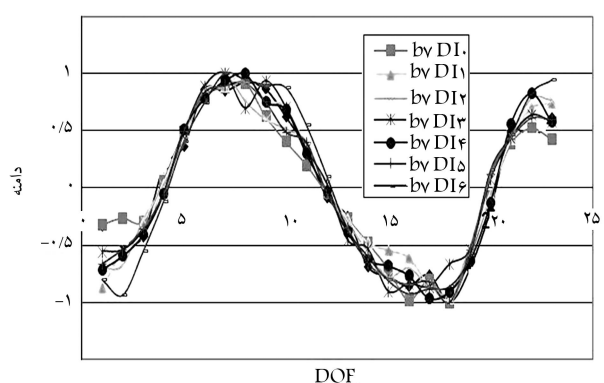
شکل ۱۸. آرماتورهای کششی چسب‌خورده‌ی تیر b7.



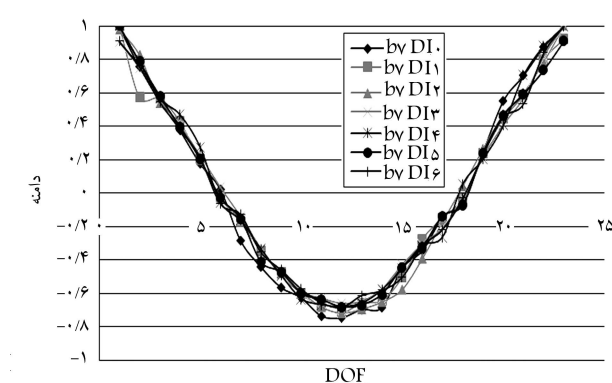
شکل ۲۴. مود دوم نمونه‌ی b6 در گام‌های بارگذاری.



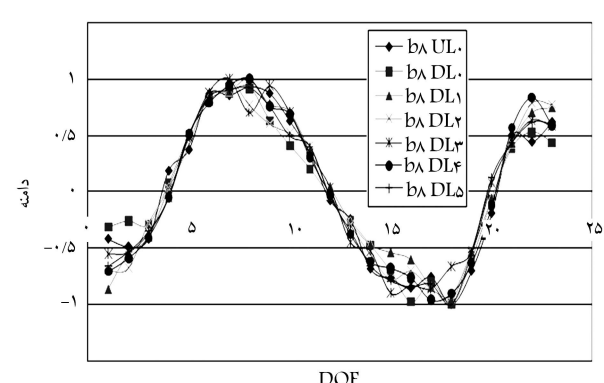
شکل ۲۵. مود اول نمونه‌ی b6 در گام‌های بارگذاری.



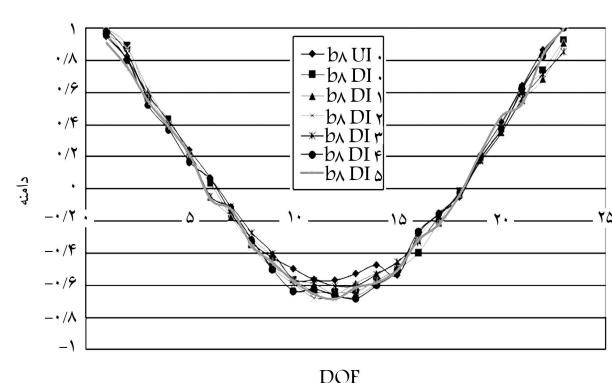
شکل ۲۶. مود دوم نمونه‌ی b7 در گام‌های بارگذاری.



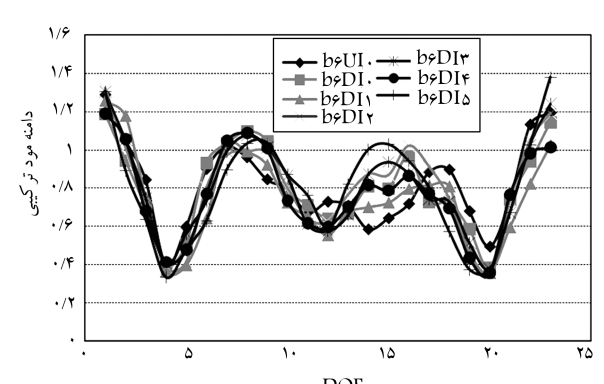
شکل ۲۷. مود اول نمونه‌ی b7 در گام‌های بارگذاری.



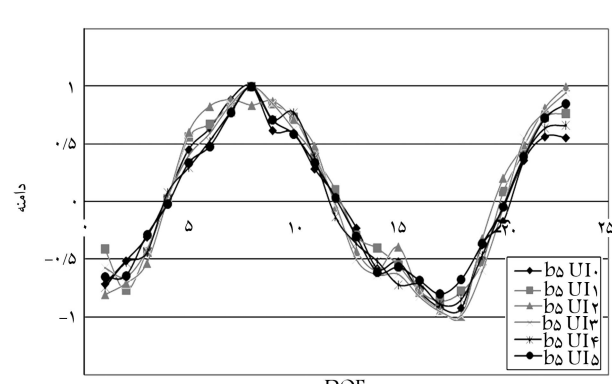
شکل ۲۸. مود دوم نمونه‌ی b8 در گام‌های بارگذاری.



شکل ۲۹. مود اول نمونه‌ی b8 در گام‌های بارگذاری.



شکل ۳۰. ترکیب مودهای اول و دوم نمونه‌ی b6 به روش مجذور مربعات.



شکل ۳۱. مود دوم نمونه‌ی b5 در گام‌های بارگذاری.

۵. نتیجه‌گیری

برای تیرهای با آرما تورکشی بیشتر حدود ۱۶٪ و برای تیرهای با آرما تورکشی کم‌تر به‌طور میانگین حدود ۸٪ بوده است.

- بسامدها، با افزایش مقدار میلگرد کششی (در مقطع تیرهای آزمایشگاهی) از ۲۲۶ میلی‌متر مربع به ۵۰۹ میلی‌متر مربع، در مراحل مختلف خسارتی افزایش یافت. این افزایش برای تیرهای بتنی با مقاومت ۲۱ مگاپاسکال حدود ۲۰٪ و برای تیرهای با مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال حدود ۲۵٪ بوده است.
- با بررسی نمودارهای مربوط به شکل مود دوم نمونه‌های تیری شکل مشاهده می‌شود که پراکندگی در شکل مودهای دوم در مراحل مختلف بارگذاری در محل خسارت قابل ملاحظه است و می‌تواند نشانه‌ی از وجود خسارت در این نواحی باشد. در نمودارهای شکل مود اول، پراکندگی قابل ملاحظه‌ی در شکل مودها در مراحل مختلف بارگذاری در محل خسارت دیده نمی‌شود.
- استفاده از جذر مجموع مربعات دامنه‌های مودهای اول و دوم می‌تواند وسیله‌ی مناسبی برای تشخیص محل خسارت باشد. نتایج حاصل از این روش نشان می‌دهد که پراکندگی مقادیر جذر مجموع مربعات دامنه‌های مود اول و دوم در مراحل مختلف بارگذاری در محل خسارت قابل ملاحظه است.

این پژوهش به‌منظور بررسی اثر مقاومت بتن، مقدار میلگرد و خسارت اولیه بر نتایج آزمایش مودال در تیرهای خمشی انجام شده است. لذا، ۸ عدد تیر بتن مسلح با ابعاد ۲۰۰ × ۱۵۰ × ۲۲۰۰ میلی‌متر ساخته شد. نمونه‌های تیری شکل از نظر مقاومت بتن (۲۱ و ۴۰ مگاپاسکال)، مقدار میلگرد کششی مورد استفاده (۵۰۹ و ۲۲۶ میلی‌متر مربع در مقطع) و خسارت اولیه، با یکدیگر متفاوت بودند. آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها شامل مراحل استاتیکی و دینامیکی بود. فرآیند آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی به‌صورت همگام با یکدیگر تا مرحله‌ی تخریب نمونه‌ها ادامه یافت. در این پژوهش، کشف خسارت اولیه با استفاده از شکل مودهای اول و دوم و نیز جذر مجموع مربعات شکل مودهای اول و دوم انجام پذیرفت. با مقایسه‌ی مقادیر آزمایشگاهی، این نتایج حاصل شده است:

- با افزایش مقاومت بتن از ۲۱ MPa به ۴۰ MPa، بسامد طبیعی نمونه‌ها در مراحل مختلف بارگذاری افزایش یافت. این افزایش، در مراحل مختلف بارگذاری،

پانوشته‌ها

1. linear variable differential transformer
2. load cell
3. data logger
4. degree of freedom (DOF)

منابع (References)

1. Mitchell, L.D. "Modal analysis bibliography", *Proceeding of the 2nd International Modal Analysis Conference*, Orlando, Florida (1984).
2. Allemang, R.J. "Experimental modal analysis bibliography", *Proceeding of the 2nd International Modal Analysis Conference*, Orlando, Florida (1984).
3. Burgueno, R.; Karbhari, V.M.; Seible, F. and Kolozs, R.T. "Experimental dynamic characterization of a FRP composite bridge superstructure assembly", *Journal of Compos. Struct.*, **54**(4), pp. 427-444 (2001).
4. Zanardo, G.; Hao, H.; Xia, Y. and Deeks, A.J. "Evaluation of the effectiveness of strengthening intervention by CFRP on MRWA bridge", *No. 3014. Journal Compos. Construct. ASCE*, **11**(4), pp. 363-374 (2007).
5. Zanardo, G.; Hao, H.; Xia, Y. and Deeks, A.J. "Stiffness assessment through modal analysis of an RC slab before and after strengthening", *Journal Bridge Engineering, ASCE*, **11**(5), pp. 590-601 (2006).
6. Wang, T.L. and Zong, Z., *Improvement of Evaluation Method for Existing Highway Bridges*, Research report, No. FL/DOT/RMC/6672-818, Miami, FL. 33199 (2002).
7. Kim, J.T.; Park, J.H. and Lee, B.J. "Vibration-based damage monitoring in model plate-girder bridges under uncertain temperature conditions", *Engineering Struct.*, **29**(7), pp. 1354-1365 (2007).
8. Farrar, C.R.; Doebling, S.W.; Cornwell, P.J. and Straser, E.G. "Variability of modal parameters measured on the Alamosa Canyon bridge", *In: Proceedings of the 15th International Modal Analysis Conference*, pp. 257-263 (1997).
9. Soneys, R. and Sas, P. "Reflections of modal analysis and its applications", *Keynote address, Proceeding of the 5th International Modal Analysis Conference*, London, UK (1987).
10. Alampalli, S. "Field performance of an FRP slab bridge", *Compos. Struct.*, **72**(4), pp. 494-502 (2006).
11. Aref, A. and Alampalli, S. "Vibration characteristics of a fiber-reinforced polymer bridge superstructure", *Journal of Compos. Struct.*, **52**(3-4), pp. 467-474 (2001).
12. Pascale, G. and Bonfiglioli, B. "Reinforced concrete beams damaged and repaired with GFRP: Dynamic testing and modeling", *In: Teng J-G, Editor, Proc. Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering*, Hong Kong, Elsevier, pp. 441-448 (2001).
13. Bonfiglioli, B.; Pascale, G. and Martinez de Mingo, S. "Dynamic testing of reinforced concrete beams damaged and repaired with CFRP sheets", *Journal Mate. In Civil Engineering, ASCE.*, **16**(5), pp. 400-406 (2004).
14. Doebling, S.W.; Farrar, C.R. and Prime, M.B. "A summary review of vibration-based damage identification methods", *Shock Vibr Digest*, **30**(2), pp. 91-105 (1998).
15. Kim, J.T.; Ryu, Y.S.; Cho, H.M. and Stubbs, N. "Damage identification in beam-type structures: Frequency-

- based method vs mode-shape-based method”, *Engineering Struct.*, **25**(1), pp. 57-67 (2003).
16. Xia, Y.; Hao, H.; Zanardo, G. and Deeks, A. “Long term vibration monitoring of an RC slab: Temperature and humidity effect”, *Engineering Struct.*, **28**(3), pp. 441-452 (2006).
 17. Khahil, A.; Greimann, L.; Wipf, T.J. and Wood, D. “Modal testing for nondestructive evaluation of bridges”, *Issue. In: Crossroads 2000 Proceedings*, pp. 109-112 (1998).
 18. Williams, C. and Salawu, O.S. “Damping as a damage indication parameter”, *In: Proceedings of 15th International Modal Analysis Conference*, **3089**(2), pp. 1531-1536 (1997).
 19. Cornwell, P.; Doebling, S.W. and Farrar, C.R. “Application of the strain energy damage detection method to plate-like structures”, *Journal Sound Vib.*, **224**(2), pp. 359-374 (1997).
 20. STAR. Structural Testing Analysis and Report. Structural Measurement System, SMS. Version 3.1, (1990).