

## تأثیر الگوهای بارگذاری مختلف در تحلیل بار افزون بر پاسخ غیرخطی پل های بتنی دارای پایه های با ارتفاع مختلف

گزل گلدیانی<sup>۱</sup>، حمیدرضا توکلی<sup>۲\*</sup>، علیرضا میرزا گل تبار<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

دریافت: ۱۴۰۲/۲/۱۱، بازنگری: ۱۴۰۲/۱/۲۰، پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۱۲، نشر آنلاین: ۱۴۰۲/۴/۱۲

### چکیده

تحلیل بار افزون یک روند استاتیکی غیرخطی است، که در آن شدت بار جانبی که عمدتاً توسط الگوی بار توزیعی از قبل تعریف شده، که نماینده نیروهای اینرسی در یک زلزله خاص بوده تا زمانی که به جابه جایی هدف یا انهدام برسد به صورت یکنواخت افزایش یافته تعریف شده است. در این تحلیل شدت کلی نیرو تغییر کرده اما الگوی بار تا انتهای تحلیل همان باقی می ماند، بنابراین نتایج تحلیل بار افزون به شدت به الگوی بار اعمالی حساس است. در تحلیل بار افزون سنتی، توزیع یکنواخت، پاسخ تنها تحت تأثیر مود اول با فرض عدم تغییر آن لحاظ می گردد، در صورتی که توزیع نیروی ثابت نمی تواند در حالت توزیع نیروهای داخلی به سبب تسلیم سازه و تغییرات مرتبط با ویژگی های ارتعاشی، شامل افزایش مشارکت مودهای بالاتر در پاسخ سازه تخمین درستی به دست دهد. بنابراین، برای توسعه و لحاظ کردن اثر مودهای بالاتر سه نمونه الگوی بار جدید در تحلیل پل بتنی با عرشه مستقیم پیوسته و پایه های با ارتفاع مختلف پیشنهاد شده است. الگو بارهای جانبی توزیع یکنواخت براساس آیین نامه FEMA-273، روش باند بالا، ترکیب طیفی مودال و روش دوم ترکیبات مودال الگوهای مورد استفاده در اینجا بوده است. بر مبنای نتایج این تحقیق، در پل های کوتاه روش ترکیبات مودال و در پل های بلند روش ترکیب طیفی مودال نزدیک ترین برآورد پارامترهای پاسخ را در بین روش های دیگر ایجاد کرده اند.

**کلیدواژه ها:** تحلیل بار افزون، توزیع یکنواخت، ترکیب طیفی مودال، ترکیبات مودال.

### ۱- مقدمه

طی سال های اخیر، مطالعات متنوعی در زمینه ارزیابی رفتار پل ها برای رسیدن به بهترین و سریع ترین تخمین برای تقاضا سازه انجام پذیرفته است.

روش Chiorean تحلیل استاتیکی غیرخطی را برای پیش بینی رفتار پل های بتنی در تمام گام های بارگذاری، از زمان ابتدای بارگذاری تا زمان انهدام اجرا کرده است. این محقق یک روش المان خطی، بر اساس هر درجه آزادی برای نمایش اثرات تسلیم پلاستیک در نظر گرفت و از این روش برای ارزیابی رفتار انهدامی یک پل بتن مسلح پیش تنیده به طول ۱۱۵ متر استفاده کرد (Chiorean, ۲۰۰۳).

Pinho در تحقیقی مقایسه چهار الگوی بار جانبی مختلف بر روی چندین نمونه پل کوتاه و بلند چند دهانه پیوسته منظم، نیمه منظم، و نامنظم را به نمایش گذاشته است. در این مطالعه،

پل ها قسمت مهمی از زیر ساخت های یک کشور هستند. پاسخ لرزه ای به عوامل متعددی از جمله ارزیابی صحیح تقاضاهای پل بستگی دارد. در حال حاضر، تجزیه و تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، به عنوان یکی از دقیق ترین روش ها برای ارزیابی تقاضاهای لرزه ای غیرالاستیک در نظر گرفته می شود که یک فرآیند بسیار وقت گیر است. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، اطلاعات خروجی حجیمی را تولید می کند که در برخی موارد، ارزیابی نتایج غیرعملی است. در روش های خطی سازی معادل، پیشنهاد می کند که، اصلاح میرایی و سختی سازه و همچنین انجام تحلیل های خطی برای ارزیابی تقاضاهای غیرخطی مورد انتظار سازه صورت گیرد (JARA و همکاران، ۲۰۱۷).



از آنجایی که طیف پاسخ و پاسخ‌های مودال حداکثر، تنها مقادیر بیشترین پاسخ موده‌های مختلف ارتعاش یک سیستم چند درجه آزادی را تحت اثر زلزله نشان می‌دهند که آن‌ها فقط تأثیر محتویات فرکانس حرکات زمین را در حوزه فرکانس نشان می‌دهند. به عبارتی دیگر، طیف پاسخ و پاسخ‌های مودال حداکثر نمی‌توانند ترکیبی از پاسخ مدها را در طول ارتعاش سازه نشان دهند در نتیجه، مهم نیست که چه نوع طیف هدف یا پاسخ مودال اوج مورد استفاده قرار می‌گیرد، انتخاب و مقیاس‌بندی حرکات زمین براساس تطبیق طیف یا پاسخ مودال تنها محتوای فرکانسی رکوردهای حرکت زمین در حوزه فرکانس را در نظر می‌گیرد. متأسفانه هیچ روشی برای انتخاب حرکت زمین وجود ندارد که تأثیر ترکیب محتویات فرکانس در حوزه زمانی را بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های ساختمان در نظر بگیرد (LIU و همکاران، ۲۰۲۰).

این مقاله در ابتدا به بررسی پاسخ‌های مودال و تأثیر حرکات زمین و در دنباله با اعمال چهار الگو بار مختلف به بررسی نتایج آن‌ها پرداخته شده است. نتایجی که توسط تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به دست آمده، به‌عنوان جواب دقیق در نظر گرفته شده و با پاسخ‌های به دست آمده توسط این روش‌ها مقایسه شده است. برای این کار از نرم‌افزار تحلیل غیرخطی CSIBridge, v.15 برای تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی استفاده شده است.

## ۲- روش تحقیق

مطالعه پارامتری بر روی پل با دو طول ۱۸۰ و ۲۸۰ (دهانه‌های کناری ۴۰ متری و دهانه‌های میانی ۵۰ متری) به ترتیب نماینده دو پل کوتاه و بلند و با گروه‌بندی منظم و نامنظم براساس ارتفاع پایه‌ها صورت گرفته است. در اصل، کوله‌ها معمولاً برای بارهای سرویس محاسبه و طراحی شده و برای سطح عملکرد لرزه‌ای کنترل می‌گردد و عموماً، فنرهای خطی معادل برای نشان دادن مهار عرشه که توسط کوله‌ها صورت گرفته، استفاده می‌شود. برای انتخاب فنر معادل، رفتار دینامیکی خاک پشت کوله‌ها، مؤلفه‌های سازه‌ای کوله‌ها و اندرکنش بین خاک و کوله در نظر گرفته می‌شود. رفتار غیرخطی قابل ملاحظه‌ایی در برخی از المان‌های کوله‌ها که از مرحله تسلیم گذشته انتظار می‌رود (Maroney و همکاران، ۱۹۹۴). در این تحقیق، رفتار کوله‌ها خطی و با یک میراگر که انرژی الاستیک اضافی موجود در آن را نمایان کند، در نظر گرفته شده است. سختی کوله‌ها نزدیک به  $K_A=75000\text{KN/m}$  و مقدار  $\delta$  میرایی اختیاری برای پاسخ آن لحاظ شده است (Restrepo، ۲۰۰۷).

تحلیل بار افزون با الگوی بار جانبی، یکنواخت افزایشی با توزیع ثابت، روش مود اول، روش تطبیقی براساس نیرو و روش تطبیقی براساس تغییر مکان تا رسیدن به جابه‌جایی هدف اعمال شده است (Pinho و همکاران، ۲۰۰۷).

Pinho و همکارانش (۲۰۰۷) در یک کارگاه آموزشی به بررسی چند روش تحلیل استاتیکی غیرخطی در چندین نمونه پل بتنی برای معرفی بهترین روش پرداخته است. مطابق با این بررسی، چهار روش طیف ظرفیت معرفی شده توسط فریمن<sup>۱</sup>، روش N2 پیشنهاد شده توسط فایفر<sup>۲</sup> و فیشینگر<sup>۳</sup>، روش آنالیز پوش‌آور مودال توسط گوئل<sup>۴</sup> و چوپرا<sup>۵</sup> و روش ACSM ترکیبی از المان‌های طراحی بر اساس جابه‌جایی که توسط پریستلی<sup>۶</sup> و کالوی<sup>۷</sup> توسعه داده شده و روش طیف ظرفیت است، که به روش طیف ظرفیت تطبیقی معروف گشته، بررسی شده است. مطابق گفته محققان، روش طیف ظرفیت تطبیقی بهترین روش برای تحلیل استاتیکی غیرخطی در بین دیگر روش‌های بررسی شده، بوده است.

در تحلیل بار افزون از بار جانبی ثابت در ارتفاع عضو استفاده شده است تا نیازهای لرزه‌ای غیرالاستیک سازه را محاسبه کند که به نظر درست می‌آید اگر ارتعاش سازه در مود اول یا مود اصلی باشد. همچنین، زمانی که تغییر شکل غیرالاستیک در سازه رخ می‌دهد، شناسایی نیروی اینرسی و نیاز لرزه‌ای به وسیله توزیع یک بار جانبی، تقریبی به دست می‌آید، که می‌تواند نتایج محافظ کارانه‌ای به همراه داشته باشد (Bhandari و همکاران، ۲۰۱۸).

رفتار پل در زلزله در مقایسه با سازه‌هایی مانند ساختمان‌ها و سایر سازه‌های بلند تفاوت قابل توجهی دارد. ساختمان‌ها براساس فلسفه طراحی تیر ضعیف ستون قوی طراحی شده‌اند، در حالی که پل‌ها برعکس، یعنی تیرهای محکم و ستون‌های ضعیف برای مقاومت در برابر زلزله دارند. بنابراین، لولاهای پلاستیکی برخلاف تیرها در ساختمان‌ها، در ستون‌ها در پل‌ها شکل می‌گیرند. بنابراین، اتلاف انرژی اساساً از طریق ستون‌های پل صورت می‌گیرد (Thakkar، ۲۰۲۰).

در اینجا، تعریف الگو بارهای جدید که توسط محققان برای ساختمان معرفی و مورد مطالعه قرار گرفته بوده است، برای سازه خاص پل مبنا قرار گرفته است. شایان ذکر است، از آنجایی که پل از نظر شکل‌گیری نسبت به ساختمان ساختار متفاوتی دارد، لذا مشاهدات و نتایج به دست آمده از مطالعات ساختمانی در این زمینه، نمی‌تواند برای پیش‌بینی پاسخ پل‌ها به کار رود، همان‌طور که در تحقیق صورت گرفته، تأکید می‌کند که درستی کاربرد روش بار افزون استاندارد برای پل‌ها جای تردید دارد (Pinho و همکاران، ۲۰۰۷).

برای رسیدن به دقت بیشتر در نمایش ظرفیت و رفتار پل در تحلیل، از الگوی تعریف شده مقاومت مورد انتظار مصالح و رابطه تنش- کرنش برای بتن محصور و غیرمحصور، همین‌طور میلگرد فولاد، باید استفاده گردد. جزئیات میلگرد ستون‌ها و دیگر مؤلفه‌های پل نیز مورد نیاز است. ویژگی‌های بتن حاوی سیمان پرتلند مطابق با مدل مندر<sup>۸</sup> برای رفتار تنش- کرنش محوری بتن محصور و غیرمحصور استفاده شده است (Mander و همکاران، ۱۹۸۸).

ویژگی‌های میلگرد طولی و عرضی مطابق با راهنمای کلترنس<sup>۹</sup> ۲۰۰۴ متناظر با ویژگی‌های فولاد ASTM A-706 تعیین می‌گردد. برای مدل مصالح فولادی با رفتار متقارن در کشش و فشار یک رفتار الاستیک تا مرحله تسلیم، سپس یک رفتار ثابت و در نتیجه ادامه رفتار تا رسیدن به کرنش سخت‌شونده لحاظ شده است. شروع کرنش سخت‌شوندگی و کاهش نهایی کرنش کششی، نقطه شکست، توسط اندازه میلگرد در مقطع عرضی تعیین می‌گردد (Chapter 4، ۲۰۱۲).

بسته نرم‌افزاری مورد استفاده در این تحقیق، CSIBridge, v.15، از خانواده نرم‌افزارهای CSI و یک برنامه‌المان محدود بوده است. مطابق با تحقیقات صورت گرفته توسط دانشگاه واشنگتن این برنامه قابلیت پیش‌بینی رفتاری تغییرمکان‌های بزرگ و تغییرمکان انهدام تحت بارگذاری دینامیکی و استاتیکی با در نظر گرفتن ویژگی‌های غیرخطی هندسی و غیرالاستیکی مصالح را دارا می‌باشد (Symans و همکاران، ۲۰۰۳).

براساس مطالعات صورت گرفته، برای اعمال دقت بالا در مدل کردن مفصل پلاستیک ستون‌ها در نرم‌افزار CSI بهترین گزینه مفصل فایبر<sup>۱۰</sup> تعیین شده است. مفصل فایبر رابطه ممان- انحنای در هر جهت خمش برای سطوح مختلف بار محوری را در سراسر تحلیل استاتیکی و دینامیکی محاسبه می‌نماید. در واقع رابطه بین خمش دو محوره و نیروی محوری و توزیع رفتار غیرخطی در سطح از رابطه مختص به دست آمده برای تنش- کرنش هر فایبر مجزا ارزیابی می‌گردد.

تعداد کل ۹ پل، همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده، مورد استفاده قرار گرفته است، که در اینجا منظور از شماره‌های ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳ ارتفاع پایه‌ها به ترتیب ۷/۵، ۱۱/۲۵، ۱۵، ۱۸/۷۵، ۲۲/۵ متر است. از آنجایی که پاسخ غیرخطی سازه به شدت به ویژگی‌های حرکت زمین وابسته است، تعداد رکوردهای زیادی برای پوشش محتوای فرکانس‌های مختلف مورد نیاز است. در اینجا، با انتخاب هفت زمین‌لرزه واقعی، تمام آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار Seismo Match (Seismosoft, 2011) به

عرشه پل برمبنای اجتناب از رفتار غیرخطی آن است، بنابراین پاسخ آن الاستیک خواهد بود و روسازه با المان‌های زیرسازه در جهت عرضی با کلید برشی درگیر شده است. زیر سازه پل‌های مورد مطالعه به شکل تک‌ستون دایره‌ای شکل است. پایه‌ها به صورت المان‌های خطی و تمرکز رفتار غیرخطی به صورت مفصل پلاستیک در پای ستون‌ها لحاظ شده است. قطر پایه‌ها در هر گروه بین ۲-۲/۵ متر متغیر است. درصد میلگرد طولی در محدوده ۱-۳/۵ درصد مطابق با طراحی صورت گرفته براساس تغییرشکل مطابق با جدول (۱) تعیین شده است (Restrepo, ۲۰۰۷).

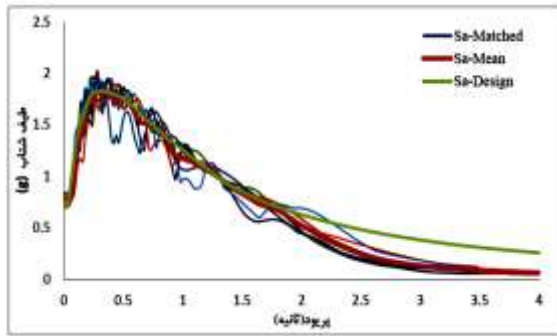
جدول ۱- مشخصات پل‌ها و پایه‌های مورد استفاده

گروه پل‌ها	شماره پایه پل	ارتفاع پایه (m)	قطر ستون (m)	درصد میلگرد طولی
۱۱۱	۱	۷/۵	۲	۳/۳۹
	۱	۷/۵	۲	۳/۳۹
	۱	۷/۵	۲	۳/۳۹
۱۲۱	۱	۷/۵	۲	۲/۱۵
	۲	۱۵	۲	۲/۱۵
	۱	۷/۵	۲	۲/۱۵
۲۱۲	۱	۷/۵	۲/۵	۲/۸۳
	۲	۱۵	۲/۵	۲/۸۳
	۱	۷/۵	۲/۲	۱/۷۷
۱۲۲	۱	۷/۵	۲/۲	۱/۷۷
	۲	۱۵	۲/۲	۱/۷۷
	۱	۷/۵	۲	۲/۸۵
۱۲۳	۱	۷/۵	۲	۲/۸۵
	۲	۱۵	۲	۲/۸۵
	۳	۲۲/۵	۲	۲/۸۵
۱۳۳	۱	۷/۵	۲/۲	۲/۳
	۳	۲۲/۵	۲/۲	۲/۳
	۱	۷/۵	۲/۵	۱/۱۲
۱۱۲۳۳	۱	۷/۵	۲/۵	۱/۱۲
	۲	۱۵	۲/۵	۱/۱۲
	۳	۲۲/۵	۲/۵	۱/۱۲
۱۱/۵۲۲/۵۲	۱	۷/۵	۲/۵	۱/۶۹
	۱/۵	۱۱/۲۵	۲/۵	۱/۶۹
	۲	۱۵	۲/۵	۱/۶۹
۱۱۳۲۱	۱	۷/۵	۲/۵	۲/۵
	۳	۲۲/۵	۲/۵	۲/۵
	۲	۱۵	۲/۵	۲/۵
	۱	۷/۵	۲/۵	۰/۹۸
	۱	۷/۵	۲/۵	۰/۹۸
	۳	۲۲/۵	۲/۵	۰/۹۸
	۱	۷/۵	۲/۵	۰/۹۸
	۲	۱۵	۲/۵	۰/۹۸
	۱	۷/۵	۲/۵	۰/۹۸

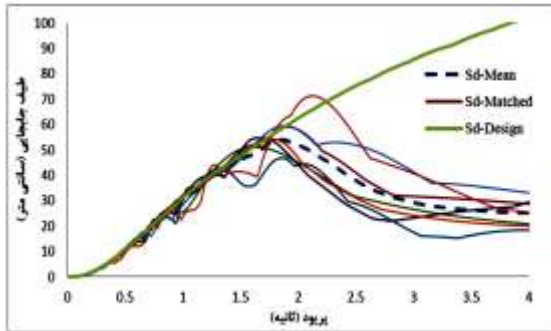
10. Fiber joint

8. Mender

9. Clarins



(الف)



(ب)

شکل ۲- الف) طیف جابه‌جایی، ب) طیف شتاب طراحی، زمین لرزه‌های تطبیقی و میانگین آن‌ها

طیف طرح با ماکزیمم شتاب زمین 0.7g (خاک نوع c مطابق با آیین‌نامه EC8) تطبیق داده شده است.

در جدول (۲) خلاصه‌ای از زمین لرزه‌های انتخابی لیست شده و در شکل (۲) طیف طراحی، طیف حاصل از رکوردهای تطبیقی و میانگین طیفی مورد استفاده به نمایش درآمده است.



شکل ۱- اشکال و گروه‌بندی پل‌های مورد مطالعه

جدول ۲- جزئیات زمین لرزه‌های انتخاب شده

کد شناسایی	نام زمین لرزه	تاریخ وقوع	Mw	فاصله (کیلومتر)	ماکزیمم شتاب زمین	مدت زمان (ثانیه)
P1096	Kocali,turkey	۸/۱۷/۱۹۹۹	۷/۴	۹۸	۰/۳۵۸	۲۷
P0736	Loma pertia	۱۰/۱۸/۱۹۸۹	۶/۹	۳۱	۰/۵۵۵	۴۰
P0099	Hollister	۱۱/۲۸/۱۹۷۴	۵/۲	۱۰	۰/۱۷۷	۳۳
P0190	Imperial valley	۱۰/۱۵/۱۹۷۹	۶/۵	۱۲	۰/۲۸۷	۱۶
P0463	Morgan Hill	۴/۲۴/۱۹۸۴	۶/۲	۳۸	۰/۱۹۰	۳۰
P0503	Mt Lewis	۳/۳۱/۱۹۸۶	۵/۶	۱۶	۰/۱۴۰	۴۰
P0267	Victoria,Mexico	۶/۹/۱۹۸۰	۶/۱	۳۷	۰/۱۵۰	۲۷

بالاتر در تحلیل‌ها چشم پوشی کرد. بنابراین تنها دو مود اول در روند تعیین الگو بارهای تحلیل بار افزون در نظر گرفته شده است.

### ۳-۱- الگوی بار یکنواخت (روش اول FEMA-273)

در این روش، الگو بار جانبی برای تحلیل بار افزون براساس نسبت جرم متمرکز المان‌ها در هر نقطه بالای پایه‌ها به کل جرم پل، مطابق رابطه زیر است:

$$F_i = \frac{m_i}{\sum m_i} \quad (1)$$

که در اینجا،  $m_i$  جرم متمرکز در هر گره کوله یا بالای پایه است. در شکل (۳) الگوی مورد استفاده برای تعیین جرم متمرکز در این

### ۳- تعیین مودهای انتخابی

تحلیل مودال بردار ویژه برای تعیین شکل مودی ارتعاش آزاد نامیرا و فرکانس‌های متناظر با آن‌ها استفاده شده است. از این تحلیل مودهای طبیعی سازه به دست می‌آید، مودهای طبیعی دید بسیار خوبی در شناخت رفتار سازه را به نمایش می‌گذارد. آن‌ها به‌عنوان پایه و اصل قوانین ترکیب مودال در طیف پاسخ محسوب می‌گردند (CSI، ۲۰۱۰).

Aviram و همکارانش (۲۰۰۸) در تحقیقی با توسعه منحنی نسبت‌های مشارکت مودها در پاسخ سازه، به نتایجی دست یافتند، با توجه به گفته آن‌ها به نظر می‌رسد که دو مود اول در پاسخ جابه‌جایی بیشترین تأثیر را داشته و می‌توان از اثر مودهای سوم و

که،  $\beta$  ضریب ترکیب مودال است، که می‌تواند به‌عنوان هر یک از ویژگی‌های ارتعاشی سیستم دینامیکی به‌عنوان مثال ضریب مشارکت مودال، طیف پاسخ الاستیک و غیره تعیین شده باشد. در این گزارش الگوی بار جانبی ترکیب طیفی مودال (MSC) مطابق زیر بیان شده است:

$$LP_{MSC} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (1 + 1/\omega_i) S_{ai}(\Gamma_i M \varphi_i) \quad (5)$$

در اینجا،  $F_i$ ،  $\varphi_i$  و  $\omega_i$  به ترتیب ضریب مشارکت مودال، شکل مودی و فرکانس مودی در مود  $i$  هستند. همچنین،  $S_{ai}$  شتاب طیفی مود  $i$  ام است، که از شتاب طیفی متناظر با پریود هر مود از پاسخ طیفی به‌دست می‌آید (Rofooei و همکاران، ۲۰۱۲).

### ۳-۴- الگوی بار ترکیبات مودال، MMC

دو روش مختلف ترکیب برای تشکیل الگو بار ترکیب مودها توسط Kalkan و Kaunas پیشنهاد شده است. این روش‌ها نیازمند انجام تحلیل بردار ویژه، به‌عنوان تحلیل الاستیک در سازه هستند. روش ترکیب مودال اول در این روش نیروهای ارتعاش فضایی اعمال شده از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$F_i = \sum a_n \Gamma_n m \varphi_n S_a(\xi_n, T_n) \quad (6)$$

که  $\alpha_n$  یک ضریب اصلاح است که مقدار آن منفی یا مثبت فرض می‌شود،  $\varphi_n$  بردار شکل مود متناظر با مود  $n$ ،  $S_a$  شتاب طیفی در پریود متناظر با مود  $n$ ، و  $\Gamma_n$  ضریب مشارکت مودال است. با در نظر گرفتن دو مود اول در رابطه (۶) رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$F_j = a_1 \Gamma_1 m \varphi_1 S_a(\xi_1, T_1) \pm a_2 \Gamma_2 m \varphi_2 S_a(\xi_2, T_2) \quad (7)$$

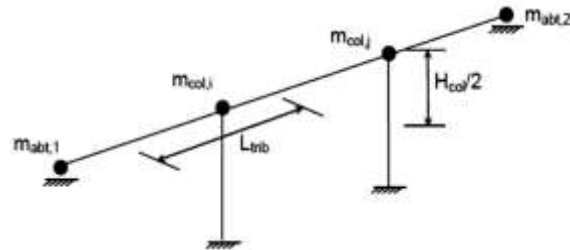
روش ترکیب مودال دوم یک روش جایگزین برای طرح ترکیبی فوق بررسی شده است. در اینجا، نیروهای جانبی به شیوه-ای مشابه به‌روش قبلی برای هر حالت مستقل تعیین و سپس با استفاده از قاعده ترکیبی مناسب مانند جذر مجموع مربعات ترکیب شده است. الگوی بار ثابت منحصر به فرد از رابطه زیر محاسبه شده است (Kalkan و همکاران، ۲۰۰۵).

$$F_j = \Gamma_j \varphi_j w S_{aj} \quad (8)$$

### ۴- ارزیابی آنالیزها و نتایج آن‌ها

پاسخ گروه‌های مختلف پل از انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی (NTH)، تحلیل بار افزون با توزیع بار یکنواخت (Uniform)، تحلیل بار افزون با الگوی بار باند بالا (upper bound)، تحلیل بار افزون با الگوی بار ترکیب طیفی مودال (MSC)، تحلیل بار افزون با الگوی بار ترکیبات مودال (MMC) تخمین زده شده است.

روابط تعریف شده است. این الگو توسط Mackay و Aviram معرفی گردیده است (Aviram و همکاران، ۲۰۰۸). البته محققین، روش‌های متنوعی برای محاسبه این جرم در پل‌ها دارند. Priestley و Mackay چندین الگو برای پل‌های تک‌ستونه بتنی در حالت اتصال صلب، اتصال مفصلی، پایه‌های با ضخامت متغییر و حتی در پایه‌ها با در نظر گرفتن اثر مودهای بالاتر پیشنهاد داده‌اند (Priestley و همکاران، ۱۹۹۶).



شکل ۳- الگوی تعیین جرم متمرکز در پل‌ها

### ۳-۲- الگوی بار باند بالا، Upper Bound

تحلیل باند بالا توسط جان تاش با استفاده از بردار بار تنها به‌دست آمده و براساس ترکیب شکل مود اول و ضریبی از شکل مود دوم پایه‌ریزی شده است. از طیف پاسخ الاستیک زمین‌لرزه-های انتخابی برای تعیین نسبت ترکیب مود دوم  $(q_2/q_1)$  باند بالا استفاده شده است، همانند رابطه (۲) که در زیر بیان شده است. در اینجا،  $\Gamma_n$  ( $n=1,2$ ) ضریب مشارکت مودال و  $D_n$  ( $n=1,2$ ) جابه-جایی طیفی متناظر با پریود مود اول و دوم الاستیک که از پاسخ طیفی الاستیک به‌دست آمده و سهم باند بالا از مود دوم با استفاده از ضرایب مشارکت مودال مشخص گردیده است:

$$(q_2/q_1) = |(\Gamma_2 D_2)/(\Gamma_1 D_1)| \quad (2)$$

بردار توزیع بار جانبی ( $F$ ) از ترکیب شکل‌های مودی اول و دوم از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

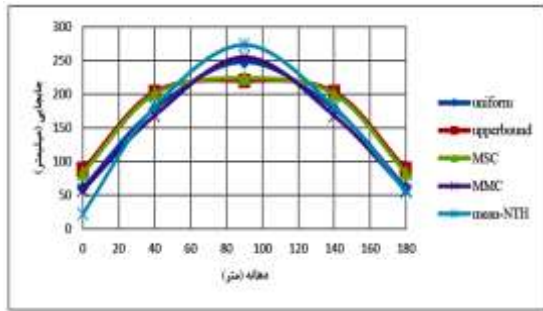
$$F = \omega_1^2 m \varphi_1 + \omega_2^2 m \varphi_2 (q_2/q_1) \quad (3)$$

که در اینجا،  $\varphi_n$  ( $n=1,2$ ) جابجایی مودال نرمالایز شده به بیشترین مقدار هر مود و  $\omega_n$  ( $n=1,2$ ) فرکانس طبیعی برای هر مود است.

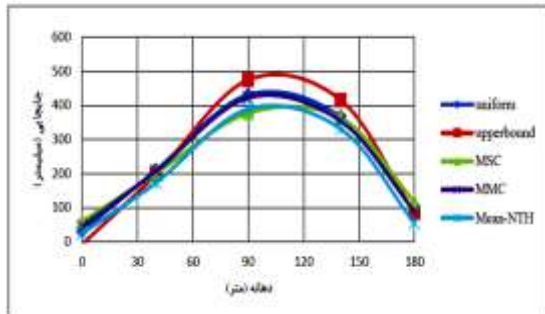
### ۳-۳- الگوی بار ترکیب طیفی مودال، MSC

در حالت کلی، الگو بار جانبی ترکیب مودال را می‌توان از ترکیب خطی مودهای مختلف در پیش بینی پارامترهای پاسخ غیرخطی مدل‌های سازه ایجاد کرد:

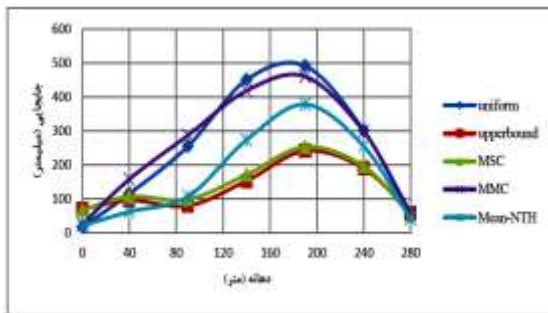
$$LP = \sum \beta_i \varphi_i = \beta_1 \varphi_1 + \beta_2 \varphi_2 + \beta_3 \varphi_3 + \dots \quad (4)$$



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵- پیش‌بینی الگوی تغییر شکل: (الف) پل گروه ۱۱۱، (ب) پل گروه ۱۲۳، (ج) پل گروه ۱۱۲۳۳

### ۵- نتایج و بحث

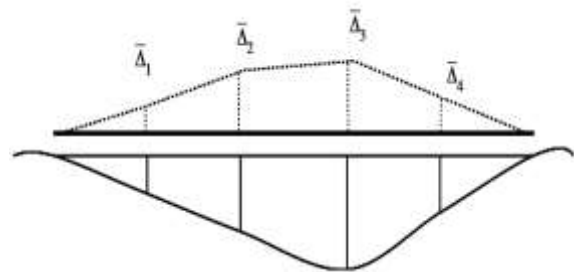
در شکل (۵) گروه ۱۱۱، تمام پایه‌ها دارای ارتفاع یکسان ۷/۵ متر است و در واقع جزو پل‌های منظم دسته‌بندی می‌گردد. همان‌طور که انتظار می‌رود، بیشترین جابه‌جایی نزدیک ستون میانی بوده است، با بررسی اجمالی از روش‌های اعمالی، دیده شده میزان دقت روش یکنواخت به نسبت روش MMC و روش MMC به نسبت دو روش دیگر بالاتر بوده است.

در گروه پل‌های نامنظم، پل مذکور با ارتفاع ۷/۵، ۱۵ و ۲۱/۵ متر، با خطاهای ۱۵ و ۲۰ و ۱۶ درصد از بین دو گروه دیگر پل‌های نامنظم کوتاه مثل گروه ۱۲۲ با خطاهای ۲۱ و ۳۱ و ۳۳ و ۲۷ درصد و گروه ۱۳۳ با خطاهای ۱۰ و ۱۷ و ۱۸ و ۲۵ درصد، بهترین پاسخ را در تطبیق با جواب دقیق، پاسخ تحلیل تاریخیچه زمانی، از به‌کارگیری روش‌های مختلف تحلیل استاتیکی توسط

نتایج به‌صورت منحنی‌هایی که جابه‌جایی عرشه در بالای هر پایه در برابر موقعیت قرارگیری پایه‌ها ترسیم کرده، به‌نمایش گذاشته شده است. برای مقایسه نتایج بار افزون با تحلیل دینامیکی تاریخیچه زمانی از مقدار میانگین پاسخ در هر هفت رکورد زلزله برای هر نقطه بالای پایه‌ها استفاده شده است، مطابق شکل (۴):

$$\hat{\Delta}_{i,NTH} = average_{j=1:7} [\Delta_{i,j-NTH}] \quad (9)$$

که در اینجا،  $\Delta_{i,j}$  جابه‌جایی بالای هر پایه  $i$ ، در هر رکورد زلزله  $j$  است. مقایسه جابه‌جایی عرشه برای چهار الگو بار و میانگین تاریخیچه زمانی، برای چند نمونه از گروه پل‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۴- الگوی میانگین تغییر مکان جانبی

در حالتی دیگر، شاخص پل (BI) به‌صورت یک معیار سنجش از شکل تغییر مکان مطابق شکل (۶) به‌دست می‌آید، بدین صورت که میانگین نتایج ارائه شده برای تمام جابه‌جایی‌های عرشه در هر گروه پل در موقعیت بالای هر پایه، به‌صورت رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$BI = average_{i=1:m} (\hat{\Delta}_i) \quad (10)$$

انحراف معیار استاندارد،  $\delta$ ، معیار سنجش پراکندگی نتایج نسبت به مقدار میانگین از روی رابطه زیر تعیین می‌گردد:

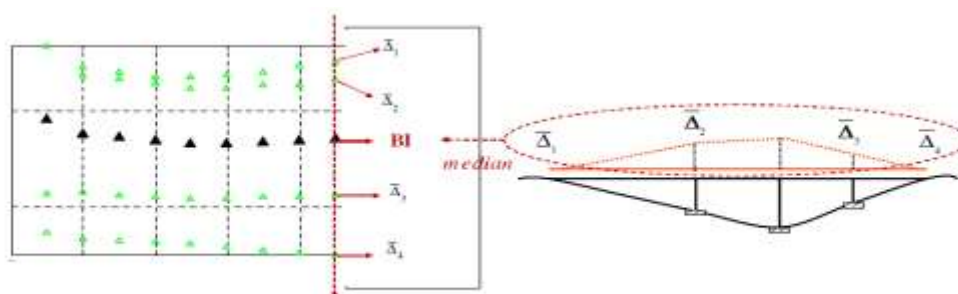
$$\delta = \left[ \frac{\sum_{i=1}^m (\hat{\Delta}_i - BI)^2}{m-1} \right]^{0.5} \quad (11)$$

$m$ ، نمایانگر تعداد پایه‌ها در هر گروه پل است (Pinho و همکاران، ۲۰۰۷). در شکل (۷) و جدول (۳) مقایسه شاخص پل و انحراف معیار به‌دست آمده از مقدار میانگین برای هر چهار الگو بار اعمال شده و میانگین به‌دست آمده از تحلیل تاریخیچه زمانی را به‌نمایش گذاشته است.

هستید، با افزایش طول پل‌ها احتمال تخمین نزدیک به تحلیل دقیق کاهش یافته است. که این خود نمایانگر ضعف الگو بارهای انتخابی در بیان تقاضای لرزه‌ای مدنظر است. در گروه ۱۲۱ با میانگین ۱۷۱/۹۳ و ۱۷۱/۲۵ و با خطاهای ۷ و ۶ درصد و در گروه ۲۱۲ با میانگین ۱۶۰/۲۷ و ۱۷۲/۰۷ و با خطاهای ۳۷ و ۴۷ درصد نسبت به حالت تاریخیچه زمانی و هم از نظر انحراف معیار با مقادیر ۸۴/۳۱ و ۸۱/۹۹ در گروه ۱۱۱ و مقادیر ۱۲۳/۲۸ و ۱۲۸/۵ در گروه ۱۲۱ و مقادیر ۹۱ و ۸۵/۲۴ در گروه ۲۱۲ که نشان‌دهنده محدوده پراکندگی پاسخ‌ها است، نزدیک‌ترین رفتار را با تاریخیچه زمانی داشته‌اند.

روش‌های ترکیب مودال و مودال طیفی و باند بالا و یکنواخت به دست آورده است، که با توجه به بالا رفتن پیروید سازه، که در اثر افزایش نامنظمی هندسی در طول پل ایجاد گشته و در قبال آن افزایش تأثیر موده‌های بالاتر قابل درک است.

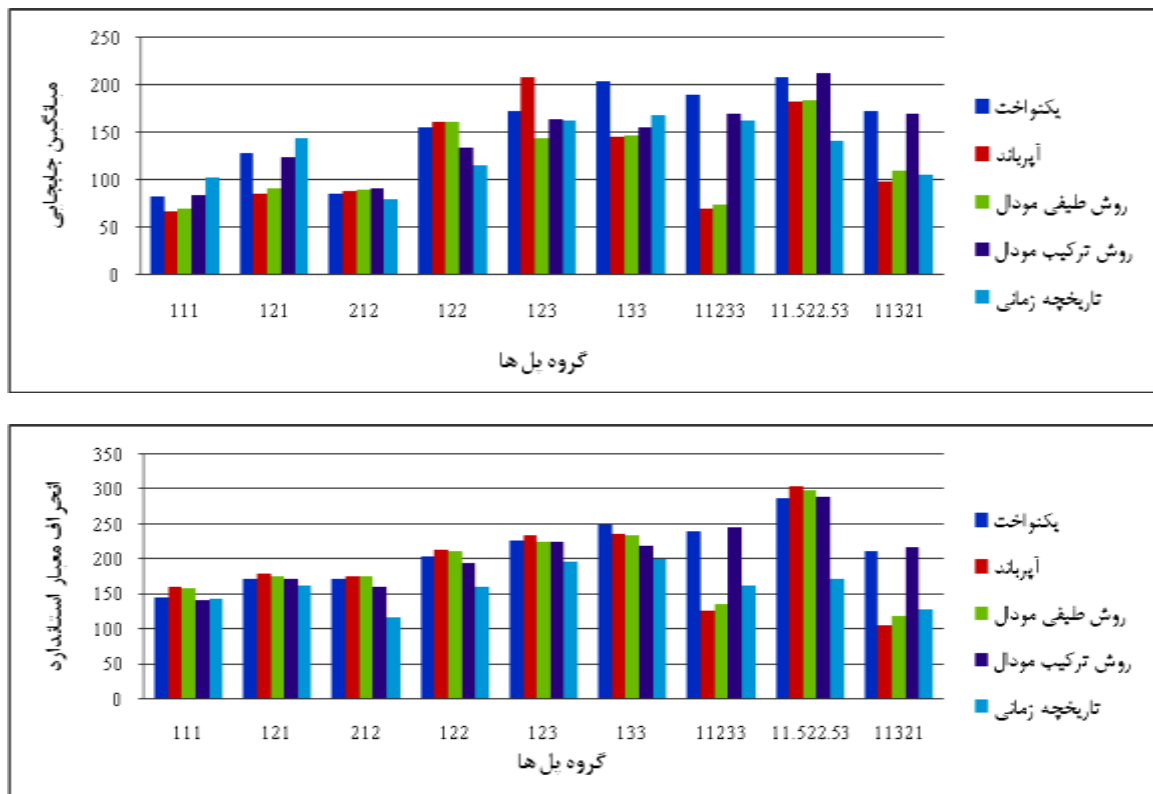
در اولین گروه از پل‌های بلند، که در رده پل‌های نامنظم قرار گرفته است، شاهد تطبیق به نسبت بهتری در دو روش آپراند و MSC در برابر دو روش یکنواخت و MMC هستید، به طوری که در گروه ۱۱۲۳۳ خطاها برابر ۱۷ درصد در روش MSC و ۲۲ درصد در روش باند بالا نسبت به خطاهای ۵۰ درصدی در روش MMC و ۴۸ درصدی در روش یکنواخت اتفاق افتاد. در اینجا شاهد



شکل ۶- تعیین مقدار شاخص پل

جدول ۳- مقادیر میانگین و انحراف معیار برای تمام گروه پل‌ها

		یکنواخت	آپراند	روش طیفی مودال	روش ترکیب مودال	تاریخیچه زمانی
۱۱۱	میانگین	۱۴۵.۱۱	۱۶۰.۸۷	۱۵۸.۱۰	۱۴۱.۲۲	۱۴۲.۵۷
	انحراف معیار استاندارد	۸۱.۹۹	۶۶.۲۵	۶۹.۱۲	۸۴.۳۱	۱۰۲.۵۹
۱۲۱	میانگین	۱۷۱.۲۵	۱۷۹.۲۰	۱۷۵.۰۴	۱۷۱.۹۳	۱۶۱.۰۷
	انحراف معیار استاندارد	۱۲۸.۵۰	۸۵.۷۶	۹۱.۳۲	۱۲۳.۲۸	۱۴۳.۵۰
۲۱۲	میانگین	۱۷۲.۰۷	۱۷۵.۵۰	۱۷۴.۵۰	۱۶۰.۲۷	۱۱۶.۹۴
	انحراف معیار استاندارد	۸۵.۲۴	۸۸.۶۹	۸۸.۸۷	۹۱.۰۰	۷۹.۰۴
۱۲۲	میانگین	۲۰۳.۷۶	۲۱۲.۶۱	۲۱۰.۰۸	۱۹۴.۱۰	۱۵۹.۹۵
	انحراف معیار استاندارد	۱۵۵.۰۲	۱۵۹.۹۳	۱۶۰.۳۲	۱۳۳.۰۱	۱۱۴.۷۷
۱۲۳	میانگین	۲۲۵.۵۳	۲۳۳.۱۴	۲۲۳.۵۷	۲۲۳.۴۰	۱۹۴.۸۲
	انحراف معیار استاندارد	۱۷۲.۲۱	۲۰۷.۸۹	۱۴۲.۹۳	۱۶۳.۳۰	۱۶۲.۴۱
۱۳۳	میانگین	۲۴۹.۲۲	۲۳۴.۹۰	۲۳۳.۶۸	۲۱۸.۲۸	۱۹۹.۲۵
	انحراف معیار استاندارد	۲۰۳.۳۴	۱۴۵.۵۱	۱۴۶.۲۲	۱۵۵.۳۵	۱۶۸.۱۳
۱۱۲۳۳	میانگین	۲۳۹.۸۱	۱۲۶.۵۹	۱۳۵.۳۰	۲۴۳.۷۹	۱۶۲.۵۰
	انحراف معیار استاندارد	۱۸۸.۲۲	۶۹.۶۱	۷۳.۲۷	۱۶۸.۶۵	۱۶۲.۵۰
۱, ۱/۵, ۲, ۲/۵, ۳	میانگین	۲۸۶.۰۳	۲۰۰.۱۱	۱۹۰.۳۳	۲۸۸.۷۴	۱۷۱.۵۸
	انحراف معیار استاندارد	۲۰۶.۹۱	۱۸۱.۶۴	۱۸۳.۲۸	۲۱۱.۹۷	۱۴۱.۲۴
۱۱۳۲۱	میانگین	۲۰۹.۹۸	۱۰۵.۷۸	۱۱۷.۸۰	۲۱۷.۰۳	۱۲۸.۶۳
	انحراف معیار استاندارد	۱۷۲.۱۶	۹۸.۴۱	۱۰۹.۷۰	۱۶۸.۴۴	۱۰۴.۶۴



شکل ۷- مقایسه میانگین جابه‌جایی، انحراف معیار استاندارد چهار الگوبر مختلف بین گروه پل ها

#### ۶- نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر، محققین روش‌های استاتیکی غیرخطی متعددی به‌منظور نمایش صحیح تقاضای لرزه‌ای سازه‌ها پیشنهاد داده‌اند. تعدادی از روش‌های پیشنهاد شده بسیار پیچیده هستند بدین‌ترتیب روش‌های ساده شده بار افزون استاتیکی بیان شده است. در این مطالعه، چند روش الگو بار جانبی چند مودی جدید، همانند روش باند بالا، upper-bound، روش ترکیب طیفی مودال، MSC و روش ترکیبات طیفی، MMC که در آن‌ها تعدادی از شکل مودها با ضربی از وزن با همدیگر ترکیب شده‌اند، که به ویژگی‌های مودال سازه و مقادیر طیفی آن‌ها وابسته است. برای بررسی کارایی الگو بارهای پیشنهادی در برآورد پاسخ غیرخطی سازه، تجزیه و تحلیل‌های مختلف تاریخچه زمانی غیرخطی در گروه‌های مختلف پل در جهت عرضی انجام شده است و به‌علاوه از روش الگوی بار یکنواخت، Uniform، به‌عنوان یک روش متداول برای مقایسه این الگوها استفاده شده است. از جابه‌جایی بالای ستون به‌دست آمده از روش‌های مختلف و تحلیل دقیق تاریخچه زمانی به‌عنوان شاخص پل استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده به‌شرح زیر می‌باشد:

- در پل‌های کوتاه، منظم و نامنظم، روش پیشنهادی ترکیبات مودال یا MMC نتایج قابل قبولی را فراهم کرده است. این

در رده‌بندی دوم که شامل گروه پل‌های نامنظم کوتاه می‌باشد، بهترین انطباق از دو روش ترکیب مودال و روش مودال طیفی دیده شده است، که این نتیجه از مشاهده میانگین جابه‌جایی که در گروه ۱۲۲ با میانگین ۱۹۴/۱ و ۲۱۰/۰۸ و با خطاهای ۲۱ و ۳۱ درصد و در گروه ۱۲۳ با میانگین ۲۲۳/۴ و ۲۲۳/۵۷ و با خطاهای ۱۵ و ۱۵ درصد و در گروه ۱۳۳ با میانگین ۲۱۸/۲۸ و ۲۳۳/۶۸ و با خطاهای ۹ و ۱۷ درصد و با انحراف معیار استاندارد ۱۳۳/۰۱ و ۱۶۰/۳۲ در گروه ۱۲۲ و انحراف معیار استاندارد ۱۶۳/۳ و ۱۴۲/۹۳ در گروه ۱۲۳ و انحراف معیار استاندارد ۱۵۵/۳۵ و ۱۴۶/۲۲ در گروه ۱۳۳، پراکندگی پاسخ‌ها نمایان است. با وارد شدن در گروه پل‌های بلند، نزدیکی پاسخ‌ها در روش باند بالا با میانگین ۱۲۶/۵۹ و خطای ۲۲ درصدی در گروه ۱۱۲۳۳ و میانگین ۲۰۰/۱۱ و خطای ۱۷ درصدی در گروه ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵ و میانگین ۱۰۵/۷۸ و خطای ۱۸ درصدی در گروه ۱۱۳۲۱، که با توجه به جامعه آماری، بهترین همپوشانی را در برابر الگو بارهای دیگر از خود نشان داده است، مشاهده می‌گردد.



CSI Analysis Reference Manual for CsiBridge, University of Berkeley, California, USA, 2010.

Jara JM, Raya G, Olmos BA, Martinez G, "Applicability of equivalent linearization methods to irregular isolated bridges", *Engineering Structures*, 2017, 141, 495-511. doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.052

Kalkan, E, Kunnath SK, "Lateral load distribution in nonlinear static procedures for seismic design", *Journal of Structures*, 2005. doi.org/10.1061/40700(2004)77

Liu Y, Kuang J, Shang, Y, Terry YP, "Modal-based ground motion selection procedure for nonlinear response time history analysis of high-rise buildings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2020, 49 (1), 95-110. doi.org/10.1002/eqe.3232

Mander JB, Priestly MJN, Park R, "Theoretical stress-strain model for confined concrete", *Journal of Structural Engineering*, 1988, 114 (8), 1804-1825. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)

Maroney BH, Chai YH "Bridge abutment stiffness and strength under earthquake loadings", *Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Workshop on the Seismic Design of Bridges*, Queenstown, New Zealand, 1994.

Pinho R, Casarotti C, Antoniou S, "A comparison of single-run pushover analysis techniques for seismic assessment of bridges", *Engineering Structures*, 2007, 30, 1335-1345. doi.org/10.1002/eqe.684

Pinho R, Casarotti C, Monteiro R, "An adaptive capacity spectrum method and other nonlinear static procedures applied to the seismic assessment of bridges", *1<sup>st</sup> US-Italy Seismic Bridge Workshop, the European Center for Training and Research in Earthquake Engineering (EUCENTRE)*, Pavia, Italy, 2007.

Priestly MJN, Seible F, Calvi CM, "Seismic design and retrofit of bridges", *A Wiley-Interscience Publication*, Canada, 1996, 163-168.

Restrepo JCO, "Displacement-based design of continuous concrete bridges under transverse seismic excitation", *Master of Science, European School for Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk*, Italy, 2007. doi.org/10.1080/15732479.2013.802813

Rofooei FR, Mirjalili MR, Attari KA, "Modal spectra combination method for pushover analysis of special steel moment resisting frames", *International Journal of Civil Engineering*, 2012, 10, (4), 245-252. doi.org/10.1002/tal.1378

Symans MD, Shattarat NK, McLean DI, Cofer WF, "Evaluation of displacement-based methods and computer software for seismic analysis of highway bridges", *Washington State Transportation Center (TRAC)*, Department of Civil and Environmental Engineering, Pullman, 2003.

Thakkar SK, "Indian seismic codes on bridges: challenges and issues for development", *ISET Journal of Earthquake Technology*, 2020, Paper No. 554, 57 (2), 79-85.

Ahmadi H, Lotfollahi-Yaghin MA, Shao YB, "Chord-side SCF distribution of central brace in internally ring-stiffened tubular KT-joints: A geometrically

روش نزدیکترین برآورد پارامترهای پاسخ را در بین روش‌های دیگر ایجاد کرده است.

- در گروه پل‌های بلند، و با افزایش نامنظمی و بالارفتن درجات آزادی سازه، روش ترکیب طیفی مودال بهترین و نزدیکترین پاسخ را در نمایش تقاضای لرزه‌ای در برابر دیگر الگو بارها داشته است، که با توجه به سادگی این الگوها هرگونه استفاده عملی و جایگزینی این روش توسط مهندسين امکان‌پذیر است.
- احتمال شروع آسیب و شدت آسیب در پل‌های منظم به مراتب کمتر از پل‌های نامنظم بوده است، که در بین خود پل‌های منظم جانمایی مختلف ستون کوتاه سبب تغییر در میزان شکنندگی گشته است. با توجه به این نتایج، زمانی که ستون کوتاه در دو طرف ستون بلند قرار گرفته است، ضعیف‌ترین شکل جانمایی برای پل منظم ایجاد شده است.
- با ملاک قرار دادن حالت خرابی کامل، در بین پل‌های نامنظم کوتاه گروه ۱۳۳ به دلیل افزایش سختی به نسبت ۳ به ۱ ضعیف‌ترین گروه در بین مجموعه خود می‌باشد، که این موضوع خود سبب می‌گردد، در صورت امکان در حین طراحی پل‌ها تا حد ممکن انتخاب به سمت پل‌های منظم یا نامنظم ولی با نسبت سختی یکنواخت‌تر متمایل گردد.
- در بین پل‌های بلند، نسبت‌های یکنواخت‌تر پایه‌ها تأثیر بیشتری داشته، تا جایی که برای احتمال رخداد خرابی یکسان برای پل گروه ۱۱۳۲۱ در شدت خطر  $0.94g$  نسبت به گروه ۱۱۳۳۳ شدت خطر  $1/15g$  بیان شده است، که نشان‌دهنده توانایی و ظرفیت بالاتر این سازه‌ها در برابر یک زمین‌لرزه با جانی متفاوت پایه‌ها را نشان می‌دهد.

## ۷- قدردانی

این تحقیق تحت حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل با شماره گرنت BUT/388011/1401 قرار گرفت.

## ۸- مراجع

Aviram A, Mackie KR, Stojadinovic B, "Guidelines for nonlinear analysis of bridge structures in California", *Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley*, 2008.

Bhandari M, Bharti SD, Shrimali MK, Datta TK, "Assessment of proposed lateral load patterns in pushover analysis for base-isolated frames", *Engineering Structures*, 2018, 175, 531-548. doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.080

Chapter4, "Seismic design and retrofit", 2012, *WSDOT Bridge Design Manual*.

Chiorean CG, "Application of pushover analysis on reinforced concrete bridge model", *4<sup>th</sup> European Workshop on the Seismic Behavior of Irregular and Complex Structures*, Thessaloniki, Greece, 2003.

parametric study", Thin-Walled Structures, 2013,  
70 (3), 93-105. doi.org/10.1016/j.tws.2013.04.011

## EXTENDED ABSTRACT

# The Effect of Different Loading Patterns in Pushover Analysis on the Nonlinear Response of Concrete Bridges with Piers of Different Height

Gazal Galdiani<sup>a</sup>, Hamidreza Tavakoli<sup>b,\*</sup>, Alireza Mirza Gholtabar<sup>b</sup>

<sup>a</sup> M.S. Student of Earthquake Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

<sup>b</sup> Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Received: 30 April 2021; Review: 09 April 2023; Accepted: 03 July 2023

### Keywords:

Pushover Analysis, Uniform Distribution, Modal Spectrum Combination, Modal Combinations

## 1. Introduction

Bridges are an important part of a country's infrastructure. The response of earthquakes depends on several factors, including the correct evaluation of bridge demands (Jara, et al. 2017). In this paper, the overall force intensity has changed, but the load pattern remains the same until the end of the analysis, so the results of the Pushover analysis are highly sensitive to the applied load pattern. In the traditional Pushover analysis, uniform distribution, the response is only considered under the influence of the first mode assuming that it does not change, if the constant force distribution cannot be used in the distribution of internal forces due to the yielding of the structure and the changes related to the vibration characteristics, including the increase the participation of higher modes in the response of the structure gives a correct estimate. Therefore, in order to develop and include the effect of higher modes, three new load pattern examples are proposed in the analysis of concrete bridge with continuous straight deck and piers of different height.

## 2. Methodology

### 2.1. Parametric study

The parametric survey on the bridge with two lengths of 180 and 280 was representative of two short and long bridges, respectively, and it has been done with regular and irregular grouping based on the height of the bases (Fig. 1). In principle, piles are usually calculated and designed for service loads and controlled for seismic performance levels, and generally, equivalent linear springs are used to represent the deck restraint provided by packs (Chapter 4). To choose an equivalent spring, the dynamic behavior of the soil behind the packs, the structural components of the packs and the interaction between the soil and the packs are considered. Considerable non-linear behavior in some elements of the packs, which is expected after the yielding stage. In this research, the behavior of the packs is considered linear and with a damper that shows the excess elastic energy in it.

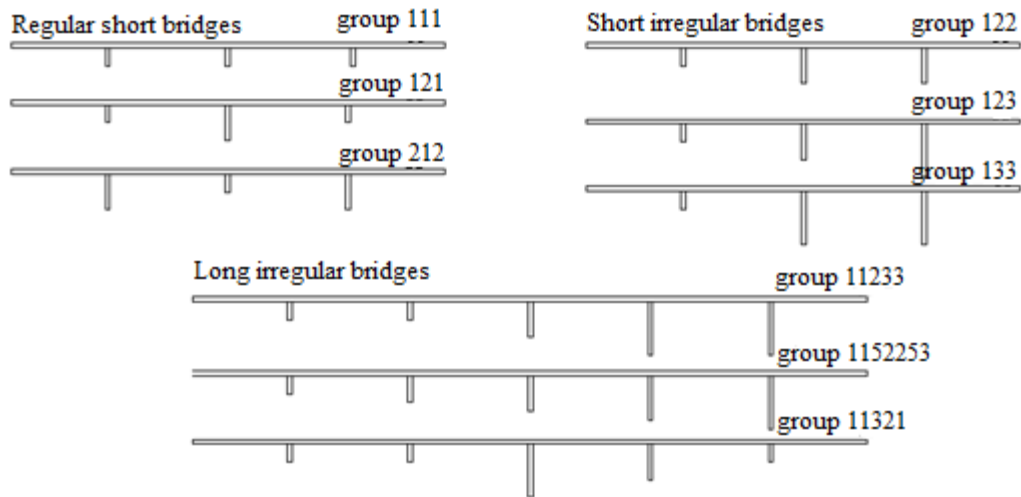


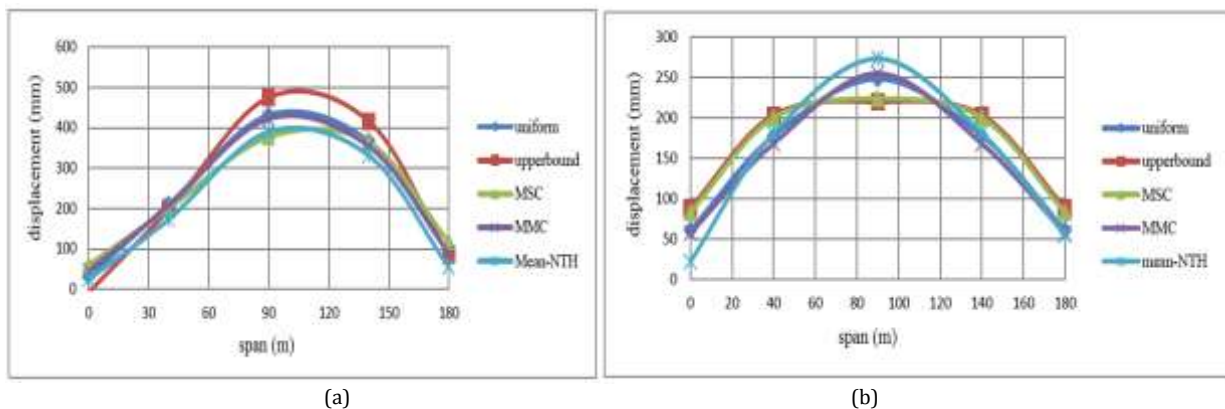
Fig. 1. Forms and grouping of studied bridges

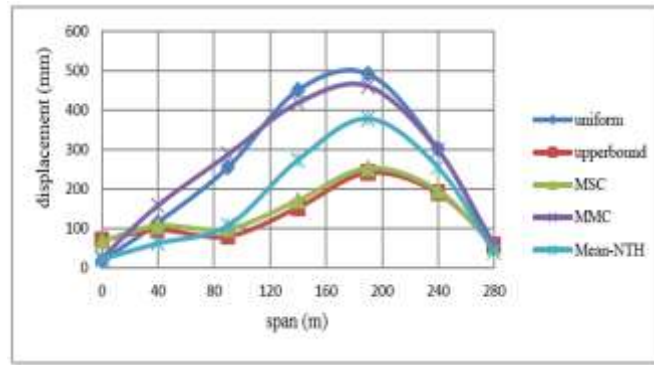
## 2.2. Properties of materials

Rebar details of columns and other bridge components are also required. The properties of concrete containing Portland cement have been used according to the Mander model for the axial stress-strain behavior of confined and unconfined concrete (Maroney & Chai, 1994). Longitudinal and transverse rebar characteristics are determined according to Caltrans 2004 guide corresponding to ASTM A-706 steel characteristics. For the model of steel materials with symmetrical behavior in tension and compression, an elastic behavior up to the yielding stage, then a static behavior and as a result the continuation of the behavior until reaching the hardening strain is considered. The beginning of the hardening strain and the final reduction of the tensile strain, the breaking point, is determined by the size of the rebar in the cross section.

## 2.3. FE modeling

The software package used in this research, CSIBridge, v.15, was from the CSI software family and a finite element program (Restrepo, 2007). According to the research conducted by the University of Washington, this program has the ability to predict the behavior of large displacements and the displacement of destruction under dynamic and static loading, taking into account the non-linear geometric and non-elastic properties of materials. Since the nonlinear response of the structure is strongly dependent on the ground motion characteristics, a large number of records are required to cover the content of different frequencies (Fig. 2). Here, by selecting seven real earthquakes, all of them have been adapted to the design with a maximum ground acceleration of 0.7g (type c according to the EC8 code) using Seismo Match software (Seismosoft, 2011).





(c)

Fig. 2. Deformation pattern prediction: (a) Group 111 bridge, (b) Group 123 bridge, (c) Group 11233 bridge

### 3. Results

The response of different bridge groups from dynamic time history analysis (NTH), overload analysis with uniform load distribution, overload analysis with upper bound load pattern, overload analysis with modal spectral composition load pattern (MSC), the overload analysis is estimated with the modal combination load model (MMC).

The results are displayed in the form of curves that draw the displacement of the deck on top of each footing against the position of the footings. To compare the results of additional load with the dynamic analysis of the time history, the average value of the response in all seven earthquake records for each point above the foundations has been used.

Fig. 3 show the comparison of the bridge index and the standard deviation obtained from the average value for all four applied load patterns, and the average obtained from the time history analysis.

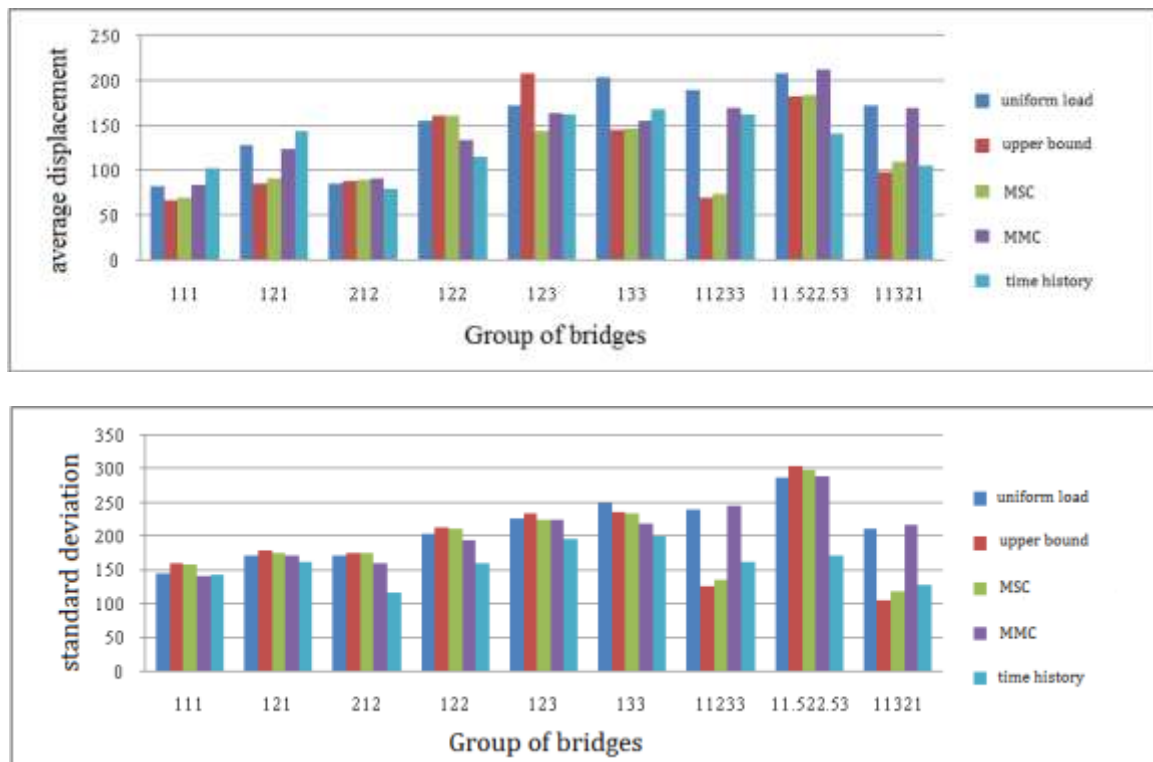


Fig. 3. Comparison of average displacement, standard deviation of four different model loads between groups of bridges

#### 4. Conclusions

In short, regular and irregular bridges, the proposed method of modal combinations or MMC has provided acceptable results. This method has produced the closest estimation of the response parameters among other methods. In the group of long bridges, and with increasing irregularity and increasing degrees of freedom of the structure, the modal spectral combination method has had the best and closest answer in showing the seismic demand against other models, which due to the simplicity of these models, any practical use and It is possible to replace this method by engineers.

#### 5. References

- Chapter 4, "Seismic design and retrofit", 2012, WSDOT Bridge Design Manual.
- Raya G, Olmos BA, Martinez G, "Applicability of equivalent linearization methods to irregular isolated bridges", *Engineering Structures*, 2017, 141, 495-511. doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.052
- Maroney BH, Chai YH "Bridge abutment stiffness and strength under earthquake loadings", *Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Workshop on the Seismic Design of Bridges*, Queenstown, New Zealand, 1994.
- Restrepo JCO, "Displacement-based design of continuous concrete bridges under transverse seismic excitation", *Master of Science, European School for Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk*, Italy, 2007. doi.org/10.1080/15732479.2013.802813