



نشریه مهندسی عمران فردوسی

فصلنامه علمی

شماره پیاپی ۴۲

ارزیابی اثرات فضایی عوامل تأثیرگذار محیطی بر فراوانی تصادفات درون شهری شیراز به روش بیز فضایی مبتنی بر فاصله اقلیدسی و همجواری
محمد صدیق باور- علی نادران - محمود صفارزاده

۲۱ بررسی فروریختگی پیش‌رونده قاب‌های مهاربندی شده با بادبند زانویی در سازه‌های فولادی تحت بار آتش‌سوزی
مرضیه اکبری - علی محمد روستا - علی‌پور منصورخانی - حامد عنایتی

۴۱ ارزیابی تأثیر میراگر جرمی تنظیم شونده بر عملکرد لرزه‌ای سازه فولادی جداسازیشده با استفاده از تحلیل زمان دوام
میلاد زربیلی نژاد - امین قلی زاد

۶۱ مدل‌سازی و تحلیل شدت تصادفات با علت تامه عدم توجه به جلو در دوران محدودیت‌های تردد کرونا با رگرسیون لجستیک
مازیار ابوالفضل زاده - سید ابراهیم عبدالمنافی حسن خاکسار

۷۳ کنترل نیمه فعال سازه سه طبقه محک به کمک شبکه سنسورهای بی‌سیم
سیدحسین فضائلی حسینی نژاد - عباس کرم الدین

۸۹ تحلیل دینامیکی غیرخطی هندسی پوسته‌های استوانه‌ای MLC با هسته FGM تحت بار ضربه با استفاده از روش اجزای محدود (یادداشت پژوهشی)
مجتبی شهرکی - فرزاد شهابیان مقدم

سر دبیر: محمدرضا اصفهانی

مدیر مسئول: فریدون ایرانی

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

هیئت تحریریه:

دکتر محمدرضا اصفهانی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر کاظم بدو	استاد، دانشگاه ارومیه، دانشکده مهندسی
دکتر جعفر بلوری بزاز	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر احمد پویا	استاد، Ecole des Ponts Paris tech
دکتر سید محمود حسینی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر ناصر حافظی مقدس	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم پایه
دکتر سیداحسان سیدی حسینی نیا	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر شهناز دانش	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه عمران
دکتر غلامرضا رخشنده رو	استاد، دانشگاه شیراز، دانشکده راه و ساختمان
دکتر محمدحسین سبط	استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران
دکتر فرزاد شهابیان مقدم	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر امیر کاووسی	استاد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی، گروه راه و ترابری
دکترحسین گنجی دوست	استاد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی، گروه راه و ترابری
دکتر محمود فغفور مغربی	استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر فریدون مقدس نژاد	استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران
دکتر ابوالفضل محمدزاده مقدم	دانشیار، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی عمران
دکتر محمدرضا کیانوش	استاد، University of Ryerson

مسئول دفتر نشریه: تکتّم هوشمند

ویراستار ادبی: الهام دهقان

ویرایش و صفحه آرایی: سیده عاطفه نوعی باغبان- تکتّم هوشمند

<http://www.srlst.com>

این نشریه در کتابخانه منطقه‌ای علوم و تکنولوژی شیراز (ISC) نمایه می‌شود.

نشانی: مشهد- دفتر نشریه - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد - صندوق پستی: ۹۱۷۷۵-۱۱۱۱

وب سایت: <http://civil-ferdowsi.um.ac.ir> پست الکترونیکی: civil-ferdowsi@um.ac.ir شماره تلفن: ۰۵۱۳۸۸۰۶۰۲۴

چاپ: چاپخانه دانشگاه فردوسی مشهد

فهرست مطالب

۱	محمد صدیق باور- علی نادران- محمود صفارزاده	ارزیابی اثرات فضایی عوامل تأثیرگذار محیطی بر فراوانی تصادفات درون شهری شیراز به روش بیز فضایی مبتنی بر فاصله اقلیدسی و همجواری
۲۱	مرضیه اکبری - علی محمد روستا - علی علی پور منصورخانی - حامد عنایتی	بررسی فروریختگی پیش‌رونده قاب‌های مهاربندی شده با بادبند زانویی در سازه‌های فولادی تحت بار آتش‌سوزی
۴۱	میلاد زریبلی نژاد - امین قلی‌زاد	ارزیابی تأثیر میراگر جرمی تنظیم شونده بر عملکرد لرزه‌ای سازه فولادی جداسازی شده با استفاده از تحلیل زمان دوام
۶۱	مازیار ابوالفضل‌زاده - سید ابراهیم عبدالمنافی حسن خاکسار	مدل‌سازی و تحلیل شدت تصادفات با علت تامة عدم توجه به جلو در دوران محدودیت‌های تردد کرونا با رگرسیون لجستیک
۷۳	سیدحسین فضائلی حسینی‌نژاد - عباس کرم‌الدین	کنترل نیمه فعال سازه سه طبقه محک به کمک شبکه سنسورهای بی‌سیم
۸۹	مجتبی شهرکی - فرزاد شهابیان مقدم	تحلیل دینامیکی غیرخطی هندسی پوسته‌های استوانه‌ای MLC با هسته FGM تحت بار ضربه با استفاده از روش اجزای محدود (یادداشت پژوهشی)



Evaluating the Spatial Impacts of Environmental Factors on the Frequency of Urban Crashes using the Spatial Bayes Method based on Euclidean Distance and Contiguity

Research Article

Mohammad Sedigh Bavar¹, Ali Naderan² , Mahmoud Saffarzadeh³

DOI: [10.22067/jfcei.2023.80940.1213](https://doi.org/10.22067/jfcei.2023.80940.1213)

1. Introduction

In recent years, the frequency and severity of injuries caused by urban traffic crashes have been increasing as one of the biggest causes of unnatural deaths in developing countries. Among the most important methods of identifying the influence of independent variables on dependent variables in terms of classification and size of data are GLM and Tobit methods, which have been used in past studies for identifying influential variables of the occurrence of macro crashes. This study aims to investigate the dimensions of EIFs of urban crashes using the spatial Bayes method based on Euclidean distance and contiguity. No study has investigated the impact of group EIFs on estimating the frequency of urban crashes, as well as comparing spatial statistics models based on a geographically weighted matrix and neighborhood distance with a Bayesian approach, so it is necessary to investigate urban crashes further. Spatial statistics can be used to control the effect of spatial correlation between environmental factors and the frequency of crashes. This study aims to use this framework to model urban macroscopic crashes to find a suitable modeling technique that can produce more reliable and accurate results.

2. Method

This study used two basic approaches of spatial statistics to analyze the data for estimating the urban frequency crashes. It used four spatial statistics models based on the geographic distance matrix with variable coefficients including GWPR and GWNBR for each TAZ, as well as SAP and SANB models with the spatial Bayes model approach and the INLA method of urban crash estimation.

The input data of the model are divided into two categories. The first category includes observed data such as number of bus stops, intersections, etc. The second category is accidental EIFs, such as the diversity index of land use type (it is a function of 14 land use categories), access to jobs index (it is a function of the distance between areas and the density of commercial and administrative use) and the access index to a transportation system (it is a function of the number of bus stops and the distance between areas).

3. Results

To show the dispersion of the data, the interquartile range statistic was used, which shows that the frequency of crashes parameter has a high dispersion in the studied area. Moreover, the number of bus stops and the average width of the thoroughfare has more dispersion than other model variables. The first category includes variables that directly affect the estimation of the frequency of crashes within the city on the TAZ scale and the second category includes indicators that indirectly affect the occurrence of crashes. The parameters of both models (GWPR and GWNBR) are allowed to change in space and have different values for each TAZ, so the values are shown in a range of changes in the whole city of Shiraz. The results showed that the parameters in both GWNBR and GWPR models passed the significance level of 10%, but in the GWNBR model, the model's parameters with a significance level of 5% more than the GWPR model were observed. Through the non-stationarity test, all parameters have significant spatial variations, and past studies have confirmed this spatial property of crash data. It is

*Manuscript received: February 4, 2023, Revised, May 6, 2023, Accepted, May 10, 2023.

¹. PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

². Corresponding author. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. **E-mail:** naderan@srbiau.ac.ir,

³. Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

commonly known as the Bayesian confidence interval (CI) that Bayesian inference uses the posterior density interval of the parameters. A 95% confidence interval is commonly used to determine the validity of a variable and includes values between the 2.5th percentile and 97.5% of the posterior probability distribution. A parameter is valid if it is 95% CI does not contain zero. At a 95% confidence level, if the two limits of a valid parameter are greater than zero, then the parameter has a positive (i.e., incremental) impact on crash frequency. Similarly, a valid parameter has a negative impact (i.e., reduction) on crash frequency if two bounds of the parameter are less than zero at the 95% confidence interval. The values of R^2 in all models are within an acceptable range. Lower values of DIC and WAIC show that SAP model has a better fit to the data and is more suitable for estimating the frequency of crashes in the city. The threshold of the difference between the DIC value in the comparison between the models is considered to be 10, and in this study, the DIC value in SAP differs much more than the easy limit with other models. In addition to the statistical criteria for comparing and evaluating the models, the predicted values of the crash frequency by the SA-based models are closer to the observed values than the SW models.

4. Conclusion

This study was conducted to examine the spatial impacts of EIFs on urban crashes using spatial statistical methods based on the Euclidean distance of the geographic weight matrix (SW) and methods based on distance and adjacency (SA). All available variables were collected in the first step. Data compression was done to reduce the effect of collinearity and autocorrelation between the independent variables. In PCA method, indicators of user diversity, access to the public transportation system, and access to jobs were indirect environmental factors. In all models, the values of the number of bus stops, average speed, average green light time, and the diversity index of the type of land use were identified as the most important crash EIFs. By controlling the factors according to their value in each TAZ, the spatial impact of crash EIFs can be reduced in that TAZ. Four spatial statistics models, GWPR, GWNBR based on Euclidean distance and SAP and SANB models based on neighborhood distance with INLA approach, were used to estimate the frequency of crashes in the city by considering the spatial effects of crash EIFs. The spatial estimation of EIFs of urban crashes in the neighborhood approach (SA) using INLA method provided better results; in other words, the neighborhood method provided better results for estimating the coefficients of EIFs than the geographically weighted matrix (SW) method for estimating the coefficients of EIFs. Previous studies have not compared SA and SW, spatial statistics models.

This study showed that in the urban areas at the TAZ level, due to the contiguity and common border in all TAZs, SA method estimates better the coefficients of EIFs. It was shown that neighborhood could have a negative impact on the estimation of EIFs coefficients; in other words, the spatial effect may reduce the severity of crashes in the spatial model compared to the classical statistical model.

In both SA and SW methods, the reduction of spatial effects in the estimation of EIFs coefficients in SANB models was quite noticeable, which shows that considering the effect of over-dispersion in the estimation of SANB models has reduced the range of spatial effects.

The identification of crash EIFs by the multi-stage investigation at district level can be useful for making policies in support of urban crash reduction measures. Among the measures that can reduce the probability of crashes in urban areas are modifying the characteristics of bus stops in inappropriate places that increase conflict between vehicles, rescheduling traffic lights, and proper control over land use changes in the city.



ارزیابی اثرات فضایی عوامل تأثیرگذار محیطی بر فراوانی تصادفات درون شهری شیراز به روش بیز فضایی

مبتنی بر فاصله اقلیدسی و همجواری*

مقاله پژوهشی

محمود صفارزاده^(۳)

علی نادران^(۲)

محمد صدیق باور^(۱)

DOI: 10.22067/jfcej.2023.80940.1213

چکیده عوامل محیطی ساخته شده یکی از مهمترین علت‌های تصادفات درون شهری است. در این مطالعات نشان داده است که علاوه بر داده‌های تصادف که دارای ناهمگونی فضایی هستند عوامل تأثیرگذار در تصادف نیز دارای همبستگی فضایی هستند. هدف اصلی این مطالعه ارزیابی اثرات فضایی عوامل تأثیرگذار محیطی بر فراوانی تصادفات درون شهری شیراز، ایران در سطح هر ناحیه ترافیکی می‌باشد. نتایج مطالعه نشان داد مدل‌های مبتنی بر فاصله و همجواری به منظور ارزیابی اثرات فضایی داده‌های تصادف و عوامل مؤثر بر آن در سطح هر ناحیه ترافیکی از دقت بیشتری نسبت به مدل‌های رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی برخوردار هستند. همچنین شاخص‌های تنوع کاربری اراضی و دسترسی به سیستم حمل و نقل عمومی تولید شده در گام اول در افزایش فراوانی تصادفات تأثیرگذار است و در هر ناحیه ترافیکی‌هایی که میزان این شاخص بالا باشد، احتمال رخداد تصادف بالاتری وجود دارد. در هیچ یک از مطالعات قبلی اثر توأمان عوامل محیطی تأثیرگذار دسته‌ای در برآورد فراوانی تصادفات درون شهری همچنین مقایسه بین مدل‌های آمار فضایی مبتنی بر ماتریس وزن‌دار جغرافیایی و مبتنی بر فاصله همجواری با رویکرد بیزی انجام نشده است؛ بنابراین لازم است در تصادفات درون شهری بررسی گردد. نتایج این مطالعه می‌تواند به منظور بهسازی اقدامات ایمنی درون شهری و همچنین برنامه‌ریزی توسعه و اقدامات آینده شهری برای مدیران و برنامه‌ریزان شهری حائز اهمیت باشد.

واژه‌های کلیدی عوامل محیطی، تصادفات درون شهری، اثر فضایی مبتنی بر همجواری، اثر فضایی مبتنی بر ماتریس فاصله، بیز فضایی.

Evaluating the Spatial Effects of Environmental Factors on Urban Crashes by Spatial Bayes Method

Mohammad Sedigh Bavar

Ali Naderan

Mahmoud Saffarzadeh

Abstract Built environmental factors are one of the most important causes of urban crashes. Studies have shown that in addition to crash data, which have spatial heterogeneity, factors influencing crashes also have a spatial correlation. The main goal of this study is to evaluate the spatial effects of environmental factors on the frequency of crashes in Shiraz, Iran, at the TAZ level. In the first step of the study, using component analysis models, important environmental factors affecting the crash were identified, and composite indicators were produced as independent variables. In the second step, to control the effect of correlation and heterogeneity of model variables, spatial statistical models based on Euclidean distance such as geographically weighted Poisson regression (GWPR), geographically weighted negative binomial distribution (GWNBR), as well as Poisson and distribution models Negative binomial based on neighbor distance is used in spatial Bayes method with INLA approach. The study's results showed that models based on distance and contiguity to evaluate the spatial effects of crash data and the factors affecting it at the TAZ level have higher accuracy than geographically weighted regression models, as well as indicators of land use diversity and access to the system. The public transport produced in the first step effectively increases the frequency of crashes, and in TAZs where this index is high, there is a higher probability of a crash. The results of this study can be important for city managers and planners to improve inner city safety measures, development planning, and future city measures.

Keywords Environmental factors, urban Crashes, spatial effect based on neighborhood, spatial effect based on distance matrix, spatial Bayes

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۱/۱۵ و تاریخ پذیرش ۱۴۰۲/۲/۱۹ می‌باشد

(۱) پژوهشگر دکتری، گروه تخصصی عمران راه و ترابری و حمل و نقل، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

(۲) نویسنده مسئول: استادیار، برنامه ریزی و مهندسی حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

Email: naderan@srbiau.ac.ir

(۳) استاد، برنامه ریزی و مهندسی حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مقدمه

در سال‌های اخیر فراوانی و شدت جراحات ناشی از تصادفات ترافیکی درون شهری به عنوان یکی از بزرگترین علل مرگ و میر غیر طبیعی در کشورهای در حال توسعه رو به افزایش بوده است. بدین منظور اجرای اقدامات فوری توسط سازمان ملل متحد و سازمان جهانی بهداشت (۲۰۲۱-۲۰۳۰) دهه اقدامات ایمنی راه‌ها) به منظور ارتقا ایمنی راه‌ها و کاهش تلفات ناشی از حوادث ترافیکی در دستور کار قرار گرفته است و به دنبال آن محققان زیادی تا کنون به دنبال شناسایی عوامل تأثیرگذار در رخداد تصادفات با استفاده از بررسی عوامل محیطی از طریق مطالعات خردنگر و کلان‌نگر بوده‌اند [1].

از مهمترین عوامل محیطی تأثیرگذار (Environmental Influencing Factors (EIFs)) در رخداد تصادفات درون شهری، طراحی شهری است که شامل کاربری زمین، مبلمان خیابان، طرح هندسی و برخی شاخص‌های ترافیکی می‌باشد [1,2]. محیط ساخته شده می‌تواند تأثیر زیادی بر عوامل محیطی تأثیرگذار تصادف مانند حجم ترافیک، سرعت و برهم کنش وسایل نقلیه داشته باشد [1,3]. بنابراین، درک عوامل محیطی تأثیرگذار تصادفات درون شهری به منظور اتخاذ اقدامات متقابل مؤثر جهت کاهش تصادفات و در نتیجه بهبود ایمنی معابر درون شهری بسیار حائز اهمیت است [1,4]. به منظور درک و شناسایی بهتر EIFs تصادفات درون شهری، علاوه بر ویژگی‌های هندسی، دموگرافی، ترافیکی و جمعیتی [5]، شاخص‌هایی چون اختلاط کاربری اراضی [6,7]، دسترسی به سیستم حمل و نقلی [8,9]، دسترسی به مشاغل [10]، به صورت جداگانه و با نگاه خردنگر مورد توجه محققان قرار گرفته است.

به منظور شناسایی چگونگی تأثیر هر یک از EIFs تصادفات درون شهری در بیشتر مطالعات گذشته از روش‌های جهانی غیرمکانی با فرض ثابت بودن ضرایب متغیرهای مستقل چون OLS [11]، رگرسیون خطی چند متغیره [12]، توزیع پواسون و دو جمله‌ای منفی [13,14]، مدل‌های مبتنی بر شبکه عصبی و سایر مدل‌های پیشگو [15,16] استفاده شده است. در مدل‌های جهانی غیر فضایی فرض می‌شود، تمامی متغیرهای تأثیرگذار در رخ داد تصادف از یکدیگر مستقل هستند (عدم همبستگی فضایی)، بنابراین در صورت وجود همبستگی فضایی نتایج برآورد مدل‌های جهانی غیرقابل اعتماد است [1,17]. بنابراین به منظور غلبه بر همبستگی فضایی بین متغیرهای

مدل از روش‌های آمار فضایی مبتنی بر ماتریس وزن‌دار (Spatial Weighted (SW)) و فاصله اقلیدسی چون روش‌های مبتنی بر GIS [18,19]، روش‌های GWR و GWPR [17]، روش‌های GTWR OLS و MGWR [20]، مبتنی بر تخمین چگالی کرنل و K-Funktion [17] و مدل‌های آمار فضایی مبتنی بر ماتریس همجواری (Spatial Adjacency (SA)) استفاده گردیده است [21,22]. مطالعات اخیر نشان داده است علاوه بر موارد مذکور یکی از روش‌های پرداختن به مدل‌سازی تصادف در سطح کلان، اتخاذ یک رویکرد مدل‌سازی سلسله مراتبی بیزی است [15,23]. خودهمبستگی فضایی در مدل‌های بیزی با استفاده از یک توزیع تصادفی، توزیع‌های احتمال قبلی خود رگرسیون شرطی (CAR) را با استفاده از چارچوب سلسله مراتبی اندازه‌گیری می‌کند.

هدف این مطالعه بررسی ابعاد EIFs تصادفات درون شهری به روش بیز فضایی مبتنی بر فاصله اقلیدسی و همجواری می‌باشد. به منظور نیل به این هدف شکاف‌های تحقیقاتی مطالعات گذشته به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

- ۱) بررسی ارتباط بین فراوانی تصادفات EIFs متغیرهای دسته اول (عوامل محیطی مشاهده شده) و دسته دوم (شاخص‌های به دست آمده از روش PCA) به صورت یکپارچه.
- ۲) شناسایی بهترین مدل فضایی جهت برآورد فراوانی تصادفات درون شهری با استفاده از دو رویکرد ۱) مدل رگرسیون پواسون و توزیع دوجمله‌ای منفی وزن‌دار جغرافیایی با استفاده از فاصله اقلیدسی با رویکرد بیز تجربی و ۲) مدل رگرسیون پواسون و توزیع دوجمله‌ای منفی فضایی با استفاده از فاصله همجواری با مدل بیزی و رویکرد INLA.

در هیچ یک از مطالعات قبلی اثر توأمان EIFs های دسته‌ای در برآورد فراوانی تصادفات درون شهری، همچنین مقایسه بین مدل‌های آمار فضایی مبتنی بر ماتریس وزن‌دار جغرافیایی و مبتنی بر فاصله همجواری با رویکرد بیزی انجام نشده است. بنابراین لازم است در تصادفات درون شهری بررسی گردد که اثر همبستگی مکانی بین عوامل محیطی فراوانی تصادفات با کدامیک از رویکردهای آمار فضایی قابل کنترل است. این مطالعه با هدف ارزیابی اثرات فضایی عوامل تأثیرگذار محیطی بر فراوانی تصادفات درون شهری شیراز به روش بیز فضایی مبتنی بر فاصله اقلیدسی و همجواری و استفاده از این چارچوب برای مدل‌سازی تصادفات

کل شهر شیراز به عنوان متغیر وابسته استفاده شده است [3]. اطلاعات متغیر وابسته به صورت مکانی و GIS-Base معاونت حمل و نقل و ترافیک شهر شیراز (Transport and Traffic Deputy (TATD)) که متولی جمع‌آوری داده‌های تصادفات درون شهری است دریافت گردیده است. این داده‌ها مربوط به بازه زمانی سال ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ بوده که در مجموع ۳۴۵۸۸ تصادف (فوتی، جرحی و خسارتی) گزارش شده است. پراکندگی تصادفات شیراز با استفاده از آمار تصادفات پلیس راهور در شکل (۱) نشان داده شده است.

براساس پیشنهاد مطالعات [24,25]، مهمترین EIFs تصادفات درون شهری در دسته اول شامل کاربری اراضی [25]، جمعیت [26]، ویژگی‌های ترافیکی چون سرعت متوسط، متوسط عرض خط، متوسط تعداد خط، تعداد ایستگاه‌های اتوبوس می‌باشند. شاخص‌های ترکیبی تأثیرگذار در تصادفات درون شهری مانند اختلاط کاربری اراضی، دسترسی به حمل و نقل عمومی و دسترسی به مشاغل و فراوانی تصادفات درون شهری در برآورد فراوانی تصادفات درون شهری کمتر مورد محققان قرار گرفته است. محاسبه شاخص‌های تأثیرگذار در رخداد تصادف نیازمند اطلاعات اضافی چون فاصله یا هزینه سفر بین نواحی است که ممکن است در دسترس محققان نباشد، جهت مشاهده جزئیات شاخص‌ها به روابط (۱ و ۲) مراجعه گردد.

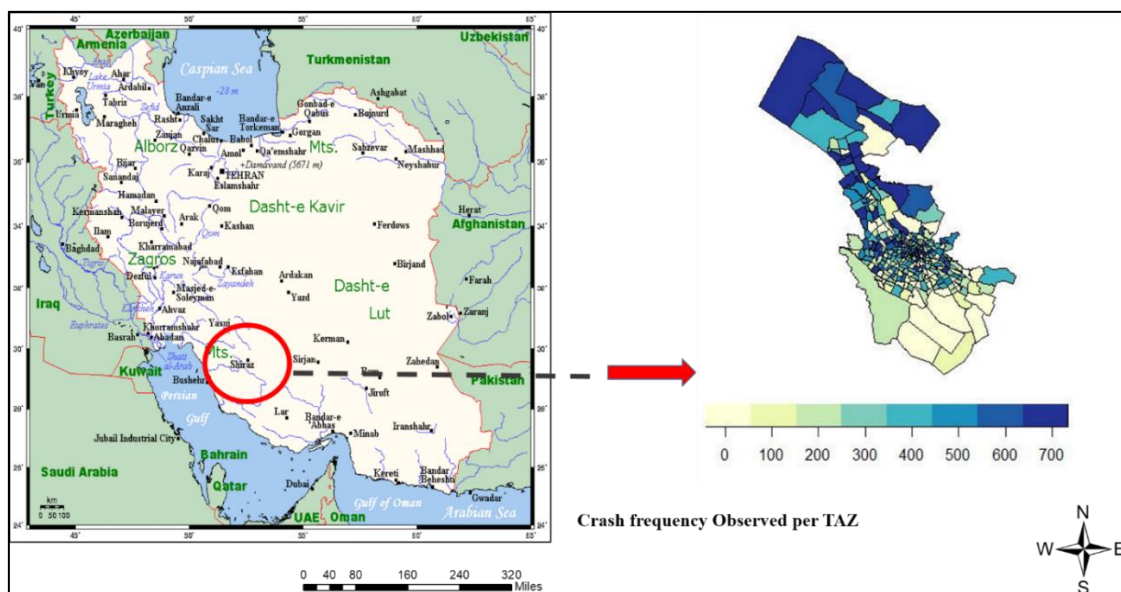
ماکروسکوپی درون شهری به منظور یافتن تکنیک مدل‌سازی مناسب، که می‌تواند نتایج قابل اعتمادتر و دقیقتری تولید کند، انجام شده است.

محدوده مورد مطالعه و داده‌های تحقیق

محدوده مورد مطالعه. شهر شیراز از لحاظ جغرافیایی در جنوب غربی ایران و در بخش مرکزی استان فارس قرار دارد. جمعیت شهر شیراز براساس آخرین سرشماری ۱۳۹۵ مرکز آمار ایران بیش از ۱,۵ میلیون نفر می‌باشد. این شهر در موقعیت جغرافیایی $(29.7323^{\circ}\text{N}, 52.6351^{\circ}\text{E})$ قرار گرفته است. ارتفاع آن از سطح دریا ۱۵۹۰ متر می‌باشد. مساحت این شهر ۱۲۹۹۰ کیلومتر مربع است که طول آن ۹۰ و عرض آن از ۲۰ تا ۳۰ کیلومتر، متغیر است (شکل ۱).

ساختار متغیرها و منابع آن. داده‌های این مطالعه به صورت GIS-Base در محدوده مورد مطالعه تهیه گردیده است در این مطالعه EIFs متشکل از دو دسته است. دسته اول شامل متغیرهای مشاهداتی محیطی و دسته دوم شامل چند شاخص ترکیبی مانند شاخص تنوع کاربری، شاخص دسترسی به مشاغل و شاخص دسترسی به سیستم حمل و نقل عمومی که از روابط (۱ و ۲) به دست می‌آیند.

در تحلیل کلانگر داده‌های تصادفات درون شهری در این مطالعه از مجموع فراوانی تصادفات در سطح نواحی ترافیکی



شکل ۱ فراوانی تصادفات در نواحی ترافیکی شیراز

تعداد واحد مسکونی، تعداد واحد تجاری، فرهنگی و مذهبی، ورزشی، آموزشی، بهداشتی درمانی، فضای سبز و مزارع، اداری ستادی، صنایع و تأسیسات و حمل و نقل، بایر و مخروبه، مختلط مسکونی و غیر مسکونی، مختلط غیر مسکونی، سایر کاربری‌ها دسته‌بندی شدند و به منظور یافتن شاخص تنوع کاربری مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور کنترل همبستگی بین متغیرهای مستقل از آزمون پیرسون استفاده گردیده است [27]. بنابراین در آزمون همبستگی پیرسون تنها از متغیرهایی که مستقیماً وارد مدل می‌شوند، استفاده شده است (جدول ۱).

در این مطالعه لایه‌های اطلاعاتی متغیرهای مستقل براساس هر ناحیه ترافیکی می‌باشد که شامل عوامل محیطی و جمعیتی شهری شامل کاربری‌های اراضی و جمعیت شهر شیراز از معاونت شهرسازی شهر شیراز تهیه گردیده است. اطلاعات توصیفی داده‌های این مطالعه در جدول (۱) نشان داده شده است. شهر شیراز دارای ۳۲۵ ناحیه ترافیکی می‌باشد و تنوع کاربری‌های اراضی در آنها براساس مطالعات طرح جامع حمل و نقل به ۳۷ دسته تقسیم‌بندی شده است که به منظور کاهش خودهمبستگی بین متغیرها به ۱۴ دسته شامل: شبکه معابر،

جدول ۱ اطلاعات توصیفی متغیرهای مطالعه

متغیرها	علامت اختصاری	حداقل	حداکثر	میان	Interquartile Range
متغیر وابسته	تعداد تصادفات	CR	7.00	686.00	72.00
متغیرهای مستقل	شبکه معابر	-	0.00	73.34	30.25
کاربری اراضی	مسکونی	-	0.00	70.18	24.26
	فرهنگی-مذهبی-جهانگردی	-	0.00	30.66	2.12
	بهداشتی-درمانی	-	0.00	84.45	1.62
	ورزشی	-	0.00	35.18	0.51
	اداری ستادی	-	0.00	87.83	1.26
	فضای سبز و مزارع و دامداری	-	0.00	86.59	4.62
	تجاری	-	0.00	30.44	2.09
	تأسیسات، صنایع و حمل و نقل	-	0.00	94.26	4.62
	بایر و متروکه	-	0.00	94.31	11.95
	آموزشی	-	0.00	73.30	3.6
	مختلط مسکونی و غیر مسکونی	-	0.00	14.16	2.9
	مختلط غیر مسکونی	-	0.00	36.37	0.92
	سایر کاربری	-	0.00	100.00	9.8
ویژگی ترافیکی	ایستگاه اتوبوس	BS	0.00	21.00	4.00
	تعداد تقاطعات	IN	0.00	13.00	3.00
	متوسط سرفاصله زمانی (min)	HD	0.05	0.80	4.00
	متوسط سرعت (km/h)	AV	20.00	49.61	2.50
	متوسط طول (km)	ALE	0.128	2.50	0.107
	متوسط زمان سبز (min)	AG	0.00	2.64	0.445
جمعیت شناسی	لگاریتم جمعیت	LP	1.00	4.00	0.625
هندسه مسیر	متوسط عرض (m)	AW	2.50	3.50	8.85
	متوسط تعداد خط	AL	1.00	4.00	1.00
شاخص تنوع کاربری اراضی	براساس رابطه (۱)	LUI	>0.001	0.835	0.160
شاخص دسترسی به مشاغل	براساس رابطه (۲)	JI	7.77	8.25	0.120
شاخص دسترسی به حمل و نقل عمومی	براساس رابطه (۲)	PTI	6.93	8.00	0.189

روش‌شناسی مطالعه

در این مطالعه ابتدا متغیرهای دسته دوم EIFs تصادف چون شاخص تنوع نوع کاربری (تابعی از ۱۴ دسته کاربری اراضی است)، شاخص دسترسی به مشاغل (تابعی از فاصله بین نواحی و تراکم کاربری تجاری و اداری است) و شاخص دسترسی به سیستم حمل و نقل عمومی (تابعی از تعداد ایستگاه‌های اتوبوس و فاصله بین نواحی است) برای هر یک از ناحیه‌های ترافیکی محاسبه می‌گردد و پس از بررسی PCA به همراه دسته اول EIFs تصادفات وارد مدل می‌شوند. در ادامه با استفاده از ۴ مدل آمار فضایی GWPR و GWNBR مبتنی بر ماتریس فاصله جغرافیایی با ضرایب متغیر برای هر ناحیه ترافیکی و نیز مدل‌های SAP و SANB با رویکرد مدل بیز فضایی و روش INLA فراوانی تصادفات درون شهری برآورد می‌گردد.

شاخص تنوع کاربری. با استنتاج از روش مطالعات شاخص تنوع کاربری اراضی به صورت مجموع نسبت مساحت هر کاربری ضرب در لگاریتم طبیعی آن؛ تقسیم بر مجموع مساحت کل کاربری‌ها محاسبه می‌گردد که شاخص آنتروپی (Entropy Index) نامیده می‌شود. سپس مقدار به دست آمده بین ۰ و ۱ مقیاس‌بندی می‌شود، به طوری که ۱، تنوع کاربری کامل زمین و ۰، تنوع کاربری زمین یا تنها یک نوع کاربری زمین خواهد بود.

$$LUI(Entropy - Index) = \sum_{i=1}^n p_i \log(p_i) / \log(N) \quad (1)$$

در رابطه (۱) LUI شاخص آنتروپی تنوع کاربری زمین، p_i درصد مساحت کاربری i در TAZ $_i$ و N مجموع کل مساحت‌ها می‌باشد [28].

شاخص دسترسی به مشاغل و سیستم حمل و نقل عمومی. با استنتاج از این روش شاخص‌ها از رابطه (۲) به دست می‌آیند.

$$PTI = \sum_{j=1}^n O_j f(c_{ij}) / O \quad (2)$$

در رابطه (۲) O_j میزان فرصت‌های موجود در مقاصد (شامل مساحت مجموع کاربری‌های غیر مسکونی در هر TAZ)

و c_{ij} هزینه سفر (در این مطالعه فاصله بین مراکز TAZ) بین ناحیه مبدأ و مقصد براساس تابع f می‌باشد.

شناسایی متغیرهای مهم در مدل با استفاده از روش (PCA). هدف روش تحلیل مؤلفه اصلی (Principal Component Analysis) (PCA) فشرده‌سازی اندازه است؛ مجموعه داده‌ها با استخراج مهمترین اطلاعات از جدول داده‌ها ساختار مشاهدات و متغیرها تجزیه و تحلیل می‌شوند و سپس متغیرهای جدیدی به نام مؤلفه‌های اصلی محاسبه می‌گردند و به صورت ترکیب خطی از متغیرهای اصلی به دست می‌آیند. بدین منظور جهت بررسی و انتخاب متغیرهای مستقل و همچنین تأثیر شاخص‌های نوع کاربری، دسترسی به مشاغل و دسترسی به سیستم حمل و نقل عمومی به همراه سایر متغیرها در مدل از روش GLM و Tobit استفاده شده است.

مدل خطی تعمیم یافته. مدل‌های خطی عمومی (GLM) یک کلاس کلی از مدل‌های آماری است که شامل بسیاری از مدل‌های متداول با ویژگی‌های خاص است. معادله GLM به صورت رابطه (۳) است [29]:

$$Y = \sum_{i=1}^m \beta_i \chi_i + \varepsilon_i \quad (3)$$

در رابطه (۳) Y پیش‌بینی خطی و ε_i پارامتر خطا است. در مدل خطی تعمیم یافته، فرضیات توزیع مستقل و نرمال در رابطه y آورده شده است. این توزیع شامل مواردی از قبیل توزیع عادی، پواسون، گاما و دوجمله‌ای است.

مدل توبیت. در این تحقیق به منظور حذف هرگونه پیش‌بینی منفی از تصادف عابر پیاده، از مدل Tobit برای شناسایی معیار رویارویی استفاده شد. مدل Tobit یک مدل آماری است که برای توصیف رابطه بین یک متغیر وابسته غیرمنفی y_i و یک متغیر مستقل (یا برداری) X_i مورد استفاده قرار می‌گیرد که به شکل رابطه (۴) نشان داده شده است:

$$y_i^* = \beta \chi_i + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, N$$

$$y_i = \begin{cases} y_i^* & \text{if } y_i^* > 0 \\ 0 & \text{if } y_i^* \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

است دقت پیش‌بینی بالاتری داشته باشد. معادله (۶) شکل کلی مدل GWNBR را نشان می‌دهد:

$$\lambda_j \sim NB \left[t_j \exp \left(\sum_k \beta_k (u_j, v_j) x_{jk} \right), \alpha(u_j, v_j) \right] \quad (6)$$

در رابطه (۶) λ_j فراوانی تصادفات پیش‌بینی شده؛ (u_j, v_j) مختصات مرکز ناحیه j برای $j = 1, 2, \dots, n$ همچنین t_j یک متغیر جبران‌کننده (offset) در ناحیه j ، پارامتر بیش پراکندگی، β_k ضریب متغیر توضیحی x_{jk} برای $k = 1, 2, \dots, K$ می‌باشد.

مدل‌های بیز فضایی مبتنی بر فاصله همجواری (با رویکرد INLA). استنتاج بیزی بر اساس توزیع احتمال پارامترهای EIFs تصادف با توجه به داده‌ها در یک محیط سلسله‌مراتبی است. اصطلاح سلسله‌مراتبی به مدل‌سازی مرحله‌ای داده‌های مشاهده شده اشاره دارد، به طوری که آنها مشروط به مجموعه‌ای از پارامترها هستند که خود از نظر پارامترهای دیگر مشخصات احتمالی داده می‌شوند. در این مطالعه از روش بیزی تقریب لاپلاس تودرتو یکپارچه (INLA) برای استنباط به عنوان یک رویکرد شناخته شده معرفی شده توسط روله و همکاران استفاده شده است. در مدل‌های بیز فضایی با رویکرد INLA؛ برآورد ضرایب متغیرهای توضیحی براساس همجواری ناحیه i با سایر نواحی انجام می‌گیرد با اعمال اثر فضایی صورت می‌گیرد به گونه‌ای که اگر ناحیه i با j دارای مرز مشترک نباشد؛ ناحیه j تأثیری در برآورد ضرایب متغیرهای توضیحی ناحیه i ندارد [31].

مدل رگرسیون ساده پواسون و توزیع دوجمله‌ای منفی هر دو از خانواده مدل‌های خطی تعمیم یافته (GLMs) هستند. برای مدل رگرسیون ساده، فرض می‌شود $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_n)'$ بردار پاسخ برای n مشاهده تصادف و $\mathbf{x}_i = (x_{1i}, \dots, x_{pi})'$ بردار p -بعدی توضیحی برای هر یک از مشاهدات است. بنابراین، برای تعریف مدل GLM با متغیر پاسخ، فرض می‌کنیم که میانگین متغیر پاسخ $E(y)$ با پیش‌بینی‌کننده خطی متغیرهای توضیحی با تابع پیوند مناسب مرتبط است. از متغیرهای توضیحی پیش‌بینی‌کننده خطی با اثر همجواری فضایی به صورت رابطه (۷) می‌باشد.

در رابطه (۴) y_i یک متغیر پنهان است که فقط در صورت مثبت مشاهده می‌شود. همچنین N تعداد مشاهدات، y_i متغیر وابسته، x_i یک بردار متغیرهای توضیحی، β یک بردار پارامترهای قابل تخمین و ε_i یک توزیع عادی و مستقل است. پارامتر خطا نیز دارای میانگین صفر و واریانس σ^2 می‌باشد.

مدل‌های فضایی مبتنی بر ماتریس وزن‌دار جغرافیایی. مدل‌های آمار فضایی مبتنی بر ماتریس وزن‌دار جغرافیایی؛ همبستگی بین متغیرهای مدل را براساس ماتریس فاصله اقلیدسی بین مراکز نواحی ترافیکی در نظر می‌گیرد، به گونه‌ای که نواحی نزدیکتر به ناحیه i تأثیر بیشتری در برآورد ضرایب متغیرهای مستقل در ناحیه i دارند و برعکس. بنابراین ضرایب متغیرهای مستقل در همه TAZها یکسان نیست. مهمترین مدل‌های برآورد فراوانی تصادفات درون شهری مدل‌های GWPR و GWNBR می‌باشند.

در این مطالعه به منظور برآورد فراوانی تصادفات درون شهری براساس متغیرهای مستقل محیطی در حالت جغرافیایی ابتدا از مدل GWPR استفاده شده است. در یک مدل GWPR، فراوانی تصادف توسط مجموعه‌ای از متغیرهای توصیفی پیش‌بینی می‌شود که در آن پارامترها مجاز به تغییر در فضا هستند. این مدل را می‌توان به صورت رابطه (۵) نوشت.

$$\ln(\lambda_i) = \beta_0(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i) \ln(E_{vi}) + \sum_{k=1}^K \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} \quad (5)$$

در رابطه (۵) λ_i فراوانی تصادفات پیش‌بینی شده در ناحیه i و (u_i, v_i) مختصات ناحیه i را مشخص می‌کند. همچنین β_0 ثابت مدل برای هر موقعیت و x_{ij} متغیر توضیحی i در ناحیه j می‌باشد. لازم به ذکر است که در GWPR، $\beta_k(u_i, v_i)$ تابعی از مختصات مرکز ناحیه i است.

به استنتاج مطالعه [30]، روش تخمین GWNBR داده‌های گسسته را به روشی غیر ثابت مدل می‌کند و بیش پراکندگی داده‌ها را در مدل لحاظ می‌کند، همچنین فرض عدم برابری واریانس و میانگین پیش فرض این مدل است. بنابراین با توجه به ماهیت بیش پراکندگی داده‌های تصادف، این مدل ممکن

بیزی از پیچیدگی خاصی برخوردار است. DIC را می‌توان به صورت رابطه (۹) تعریف کرد:

$$DIC = D(\hat{\theta}) + 2\rho D = \bar{D} + \rho D \quad (۹)$$

در رابطه (۹) $D(\hat{\theta})$ انحراف با استفاده از مقادیر میانگین خلفی (posterior) پارامتر مورد نظر است، $\bar{D}$ میانگین خلفی انحرافات و ρD تعداد مؤثر پارامترها در مدل است. در این مطالعه همچنین از (Watanabe-Akaike information criterion) که یکی دیگر از معیارهای بیزی جهت شناسایی مدل ارجح تر است، استفاده گردیده است. در نهایت از RMSE (Root Mean Square Error) به R^2 در جهت محاسبه ریشه میانگین مربعات (Median absolute deviation)، خطای فراوانی تصادفات استفاده شده است.

نتایج مدل‌سازی و بحث

اطلاعات توصیفی داده‌ها. از سال ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ در مجموع (فوتی، جرحی، خسارتی) تعداد ۳۴۵۸۸ تصادف در شهر شیراز گزارش شده است که به طور متوسط در هر ناحیه ترافیکی ۱۰۶ تصادف (حداقل ۷ و حداکثر ۶۸۶) در ۳۲۵ ناحیه ترافیکی اتفاق افتاده است.

در این مطالعه به منظور نشان دادن میزان پراکندگی داده‌های مطالعه از آماره دامنه میان چارکی استفاده گردیده است، که نشان می‌دهد پارامتر فراوانی تصادفات دارای پراکندگی زیاد در محدوده مورد مطالعه است. همچنین متغیر تعداد ایستگاه‌های اتوبوس و متوسط عرض معبر دارای پراکندگی بیشتری نسبت به سایر متغیرهای مدل هستند.

جدول (۲) نتایج مدل‌های GLM و Tobit نشان داده شده است که براساس آن فشرده‌سازی داده‌ها و تولید شاخص‌های تنوع نوع کاربری، دسترسی به مشاغل و سیستم حمل و نقل عمومی در مدل نتایج مناسبتری را به دنبال دارد. بنابراین در این مطالعه از دو دسته متغیر EIFs تصادف درون شهری استفاده شده است. دسته اول شامل متغیرهایی هستند که به طور مستقیم در برآورد فراوانی تصادف درون شهری در مقیاس TAZ تأثیر گذارند (جدول ۱: جمعیت، ایستگاه اتوبوس، تقاطعات، سرفاصله زمانی، متوسط سرعت، متوسط عرض معبر، متوسط طول معبر، متوسط تعداد خط، سرفاصله زمانی، متوسط زمان

$$\eta_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^p x_{ij} \beta_j + \sum_{k=1}^K f(z_k) + \varepsilon_i \quad (۷)$$

در رابطه (۷) β_0 ثابت مدل و β_j ضرایبی هستند که نشان دهنده اثر خطی متغیرهای کمکی x_{ij} هستند. $f(z_k)$ توابعی از متغیرهای کمکی z_k هستند که برای ملایم کردن این روابط خطی یا معرفی اثرات تصادفی استفاده می‌شوند و ε_i جزء خطای بدون ساختار (یعنی فاقد ساختار فضایی یا سریالی) است.

از آنجایی که برخی از عوامل مکانی در وقوع تصادف مؤثرتر هستند همچنین در بسیاری از موارد داده‌های تصادف یک وابستگی منطقه‌ای فضایی دارند به این معنی که هر منطقه رفتاری وابسته با همسایگان خود دارد. بنابراین در این مطالعه یکی از مفروضات ساختار فضایی رایج برای داده‌های منطقه‌ای، مدل خودرگرسیون شرطی است. از مدل CAR ذاتی (ICAR) برای محاسبه وابستگی فضایی استفاده گردیده است. اکنون، مدل ICAR با فرض $\mathbf{Z} = (z_1, \dots, z_n)'$ به عنوان بردار متغیرهای توضیحی فضایی به طور خلاصه به صورت رابطه (۸) است.

$$f(z_i | z_{i-1}), \sigma_z^2 \sim N \left(\frac{1}{|\delta_i|} \sum_{j \in \delta_i} z_j, \frac{\sigma_z^2}{|\delta_i|} \right), \quad (۸)$$

در رابطه (۸) z_i تمام اعضای بردار $\mathbf{Z}$ به جز شماره آن است. δ_i مجموعه همسایه‌ها برای همسایگان ناحیه i و $|\delta_i|$ اندازه مجموعه است. همچنین σ_z^2 پارامتر واریانس مدل ICAR است.

ارزیابی و اعتبار سنجی مدل‌ها. در این مطالعه، از سه معیار به عنوان خوب بودن برازش (criteria as a goodness of fit) (GOF) و دقت پیش‌بینی بر اساس مطالعات ساها و همکاران استفاده شده است. معیار (Deviance Information Criteria) DIC یکی از مهمترین معیارهایی است که برای ارزیابی مدل رگرسیون ساده پواسون و توزیع دو جمله‌ای منفی در مطالعات گذشته مورد استفاده قرار گرفته است. DIC تعمیم معیار اطلاعاتی Akaike است که توسط ارائه شده است و یک معیار

جدول (۳) همبستگی خطی پیرسون بین جفت متغیرهای مستقل مدل را نشان می‌دهد که براساس آن بالای ۹۰ درصد از متغیرهای مستقل با یکدیگر همبستگی خطی کمتر از ۴۰ درصد دارند. براساس مطالعات گذشته مقدار ضریب همبستگی پیرسون معادل ۵۰ درصد به عنوان آستانه همبستگی قوی در نظر گرفته شده است که در این مطالعه رؤیت نگردید.

سبزی و دسته دوم شاخص‌هایی هستند که به طور غیر مستقیم در رخداد تصادفات تأثیر گذارند (شاخص تنوع کاربری، شاخص دسترسی به مشاغل و شاخص دسترسی به سیستم حمل و نقل عمومی)، این شاخص‌ها براساس روابط (۱ و ۲) محاسبه گردیده‌اند.

جدول ۲ نتایج آزمون انتخاب متغیرها

Model Type	MAD	RMSE
GLM Using All Variables	45.64	77.41
GLM Using PCA Variables	25.21	61.16
Tobit Using All Variables	45.62	42.96
Tobit Using PCA Variables	17.91	25.49

جدول ۳ همبستگی بین متغیرهای دسته اول

Variables	Correlation	BS	AH	AS	ALE	AL	AW	LS	AG	IN	LUI	JI	PTI
BS	Pearson	1											
	Sig. (2-tailed)												
AH	Pearson	.28**	1										
	Sig. (2-tailed)	.000											
AS	Pearson	.100	.530**	1									
	Sig. (2-tailed)	.072	.000										
ALE	Pearson	.039	.306**	.055	1								
	Sig. (2-tailed)	.486	.000	.321									
AL	Pearson	.13*	.173**	.175**	.097	1							
	Sig. (2-tailed)	.012	.002	.002	.080								
AW	Pearson	.22**	-.056	.100	-.060	.47**	1						
	Sig. (2-tailed)	.000	.316	.071	.278	.000							
LS	Pearson	.24**	-.142*	-.078	-.528**	.071	.277**	1					
	Sig. (2-tailed)	.000	.010	.159	.000	.204	.000						
AG	Pearson	.055	-.131*	.047	-.289**	.010	.448**	.183**	1				
	Sig. (2-tailed)	.325	.018	.394	.000	.851	.000	.001					
IN	Pearson	.26**	-.008	.088	-.182**	.13*	.156**	.201**	.097	1			
	Sig. (2-tailed)	.000	.885	.112	.001	.015	.005	.000	.079				
LUI	Pearson	.005*	-.131*	.041	.189**	.011	.147**	.103**	.110	.421**	1		
	Sig. (2-tailed)	.004	.003	.044	.000	.051	.000	.001	.071	.000	.000		
JI	Pearson	.021	.478**	.133**	.189**	.210	.038**	.123**	.011	.218**	.128**	1	
	Sig. (2-tailed)	.151	.000	.001	.000	.151	.001	.001	.351	.001	.001		
PTI	Pearson	.210	.403**	.111**	-.211**	.013	.118**	.113**	.019	.028**	.421**	.448**	1
	Sig. (2-tailed)	.151	.001	.001	.001	.351	.000	.001	.851	.000	.000	.000	
**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).													
*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).													

جدول ۴ نتایج مدل سازی به روش GWPR و GWNBR

GWPR Model Result								
Variables	Mean. Est.	Min. Est.	Max. Est.	Rang	Lwr. Est.	Upr. Est.	Delta	Non-Stationary Test
Intercept	4.4183*	3.9377	5.0136	1.0759	4.2651	4.5442	0.279	Yes
Bus	0.1485*	-0.294	0.6556	0.9496	0.0209	0.2541	0.233	Yes
AH	-0.0973**	-0.6145	0.2568	0.8713	-0.210	0.0588	0.269	Yes
AS	0.1945**	-0.4019	0.6679	1.0698	0.1200	0.2779	0.157	Yes
AL	0.1298*	-0.9172	1.2072	2.1244	-0.056	0.3369	0.393	Yes
ALE	0.1218*	-0.1864	0.3933	0.5797	0.0319	0.2207	0.188	Yes
LP	0.0392*	-0.2827	0.4057	0.6884	-0.071	0.1501	0.221	Yes
AG	0.2370*	-0.2524	1.3992	1.6516	-0.027	0.4477	0.475	Yes
IN	-0.1146**	-0.3242	0.1669	0.4911	-0.188	-0.056	0.131	Yes
PTI	0.1638**	-0.0204	0.4349	0.4553	0.0729	0.2401	0.167	Yes
LUI	0.2798*	-0.4451	0.1799	0.625	-1.0026	1.7095	2.712	Yes
JI	0.0135**	-0.2939	0.3549	0.6488	-0.032	0.0607	0.093	Yes
Summary Statistics								
DIC		3378.42						
WAIC		3241.35						
Pseudo R2		0.758						
RMSE		55.32						
GWNBR Model Result								
Variables	Mean. Est.	Min. Est.	Max. Est.	Rang ^a	Lwr. Est.	Upr. Est.	Delta ^b	Non-Stationary Test
Intercept	-4.327**	-15.922	2.391	18.31	-7.321	0.189	-1.60	Yes
Bus	0.019**	-0.041	0.042	0.083	-0.0008	0.003	0.015	Yes
AH	0.042*	0.011	0.062	0.051	0.023	0.047	-0.41	Yes
AS	-0.032*	-0.049	0.004	0.053	-0.073	0.002	0.64	Yes
AL	0.018**	0.009	0.036	0.027	0.016	0.015	0.641	Yes
ALE	0.191*	0.095	0.186	0.091	0.109	0.136	-0.41	Yes
LP	0.626*	0.193	0.635	0.442	0.284	0.318	0.39	Yes
AG	0.517**	0.365	0.894	0.529	0.424	0.641	0.745	Yes
IN	0.041**	-0.036	0.394	0.43	0.031	0.189	0.128	Yes
PTI	0.624*	-0.264	0.0371	0.301	-0.047	0.012	0.011	Yes
LUI	0.164**	0.036	0.631	0.595	0.083	0.284	-0.84	Yes
JI	0.495**	0.171	0.531	0.36	0.285	0.297	0.157	Yes
Summary Statistics								
DIC		3189.43						
WAIC		2945.31						
Pseudo R2		0.728						
RMSE		85.31						

**significant at the 5% level

* significant at the 10% level

^aRang= Max. Est.- Min. Est.^bDelta =Upper Est. - LowerEst.; YES= Delta > 1.96 Std. Err. indicating the non-stationarity test was passed.

و GWPR سطح معناداری ۱۰ درصد را پاس کرده اند اما در مدل GWNBR پارامترهای مدل با سطح معناداری ۵ درصد بیشتر از مدل GWPR مشاهده شده است. از طریق آزمون غیر ایستایی، همه پارامترها دارای تغییرات فضایی قابل توجهی هستند که مطالعات گذشته این خاصیت فضایی داده های تصادف را تأیید کرده است.

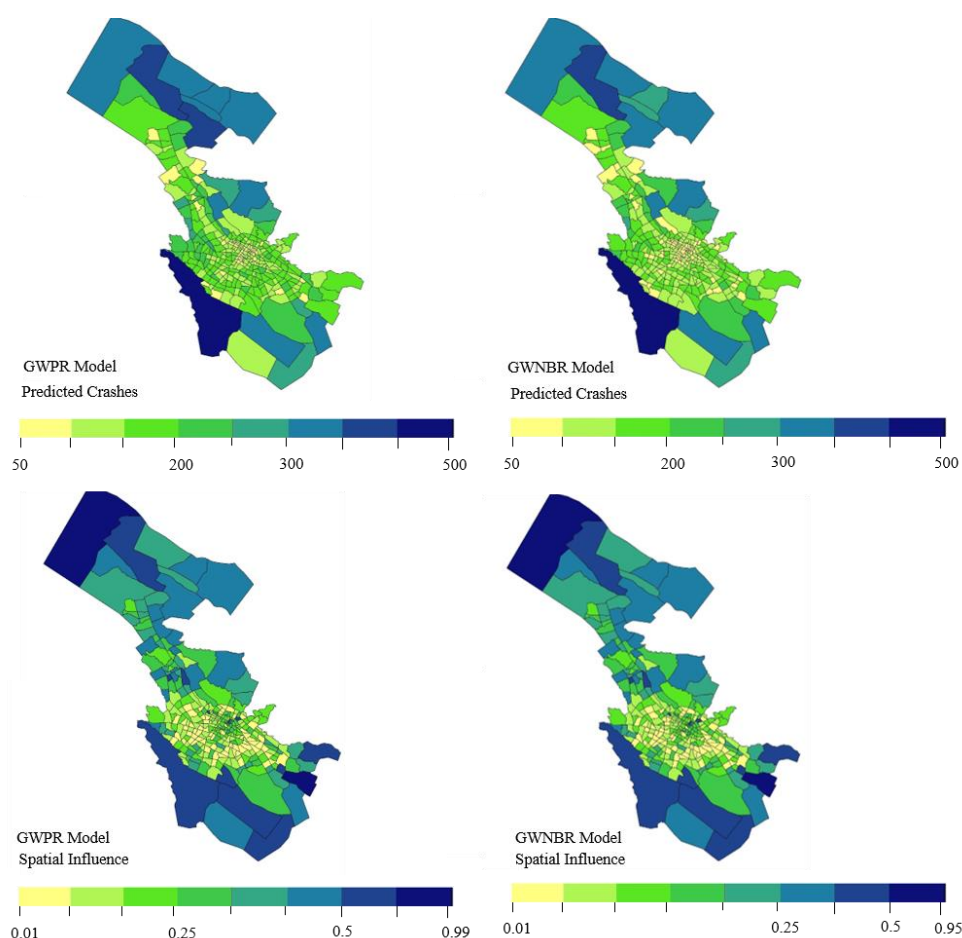
برآورد فراوانی تصادفات درون شهری به روش SW. جدول (۴)، نتایج برآورد فراوانی تصادف درون شهری براساس متغیرهای توضیحی به روش GWPR و GWNBR را نشان می دهد. پارامترهای هر دو مدل مجاز هستند در فضا تغییر کنند و برای هر TAZ مقادیر متفاوتی دارند. بنابراین مقادیر نشان داده شده در بازه ای از تغییرات در سطح کل شهر شیراز را نشان می دهد. نتایج نشان داده است پارامترها در هر دو مدل GWNBR

فضایی محسوس است (مانند شمال و جنوب شهر شیراز) بالاترین تأثیر را در رخداد تصادف دارد که با مطالعه همخوانی دارد.

در TAZهایی که اثر فضایی کمتر مشاهده می‌شود (مرکز شهر شیراز) تأثیر زمان سبز چراغ بر رخداد تصادف در هر دو مدل GWPR و GWNBR بیشتر از سایر متغیرها می‌باشد. در هر دو مدل نشان داده شده است که تمامی شاخص‌های ایجاد شده در این مطالعه در رخداد تصادفات درون شهری تأثیرگذار بوده‌اند که از بین آنها شاخص تنوع کاربری تأثیر بالاتری در رخداد تصادفات درون شهری داشته است که مطالعات همخوانی دارد.

شکل (۲) نتایج پیش‌بینی فراوانی تصادفات درون شهری و همچنین اثر فضایی در هر یک از TAZها به روش SW را نشان می‌دهد.

در جدول (۴) در مدل GWPR بازه تغییرات ضریب متغیر ایستگاه اتوبوس در کل مطالعه از حداقل (-0.294) تا حداکثر (0.655) مجاز به تغییر در فضا بوده است که نشان می‌دهد تحت تأثیر اثر فضایی در هر یک از TAZها این متغیر به چه میزان در رخداد تصادفات تأثیر گذار بوده است. این مقدار از میزان مشابه در مدل GWNBR بیشتر به دست آمده است (حداقل -0.041 و حداکثر 0.042) بنابراین نشان می‌دهد در مدل GWNBR به دلیل تعدیل اثر بیش پراکندگی داده‌ها میزان اثر فضایی به حداقل رسیده است، همچنین حداکثر بازه تغییرات ضرایب متغیرهای مستقل در مدل GWPR مربوط به متغیر AL (Rang: 2.124) و حداقل آن مربوط به PTI (Rang: 0.455) به دست آمده است که این میزان تغییرات در مدل GWNBR به طور قابل توجهی کمتر به دست آمده است (حداکثر INT Rang: 0.595 و حداقل AL Rang: 0.027). بنابراین براساس نتایج تحقیق در مدل GWPR متغیر AL در TAZهایی که اثر



شکل ۲. برآورد فراوانی تصادفات درون شهری و اثر فضایی متغیرهای مستقل به روش SW

متغیرهای مستقل تأثیرگذار بوده است. در هر دو مدل، میانگین خلفی (posterior) برای تعداد ایستگاه‌های اتوبوس مثبت است. این نتیجه منعکس کننده انتظاراتی است که افزایش تعداد ایستگاه‌های اتوبوس باید احتمال تصادف را افزایش دهد. بنابراین منطقی است که TAZ‌هایی که تعداد ایستگاه‌های اتوبوس بیشتری نیز داشته باشند تعداد تصادف بیشتری داشته باشند که با مطالعه [32] همخوانی دارد. یک نتیجه دور از انتظار، میانگین خلفی منفی PTI است که در هر دو مدل مشاهده شده که نتیجه مطالعه [33] آن را تأیید می‌کند و با مطالعه [34] همخوانی ندارد. میانگین خلفی متغیر LUI در این مطالعه مثبت به دست آمده است که نشان می‌دهد افزایش تنوع نوع کاربری در TAZ باعث افزایش فراوانی تصادفات می‌گردد که با مطالعه [25] سازگاری دارد بنابراین افزایش تنوع کاربری در TAZ به دلیل تداخل انواع سفرها در یک محدوده خاص باعث رخداد تصادف می‌گردد.

همان گونه که مورد انتظار بود متغیر AS در رخداد تصادف در هر دو مدل مثبت به دست آمد بنابراین نشان می‌دهد افزایش سرعت در TAZ افزایش فراوانی تصادف را به دنبال دارد که با مطالعات گذشته همخوانی دارد [35]. یکی از مهمترین متغیرهایی که ارتباط مثبت با رخداد تصادف دارد متغیر AL به دست آمده است که مطالعات [36] آن را تأیید می‌کند. تأثیر تعداد خط عبوری بر رخداد تصادف را نشان داده است همچنین ارتباط بین فراوانی تصادفات و متغیرهای IN و AG در هر دو مدل مثبت به دست آمده است که البته نسبت به سایر متغیرها مانند AS و AL تأثیر کمتری دارند بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش تعداد تقاطعات و افزایش زمان سبز در هر TAZ تعداد تصادفات در آن TAZ افزایش یابد که با مطالعه [37] همخوانی دارد. به طور کلی از ۱۲ متغیر مستقل این مطالعه در هر دو مدل SAP و SANB روش INLA تعداد ۸ متغیر معنادار بوده‌اند که نشان دهنده تأثیر قابل قبول متغیرهای انتخابی بر رخداد تصادفات درون شهری است. به صورت مقایسه‌ای می‌توان گفت در TAZ‌های که تعداد ایستگاه اتوبوس بیشتر و تنوع کاربری بیشتر و همچنین سرعت وسایل نقلیه بیشتر است احتمال رخداد تصادف در آن بیشتر است نسبت به TAZ‌های که مقادیر ضریب میانگین خلفی این سه متغیر کمتر از سایر TAZ‌ها گزارش شده است این نوع مقایسه در مطالعات [23] دیده شده است.

در روش GWPR اثر فضایی در کل محدوده مطالعه مشاهده شده است که بیشترین آن در قسمت شمال و جنوب شهر است اما در روش GWNBR اثر فضایی در مناطق شمال و جنوب شهر تمرکز دارد و در سایر مناطق مقادیر آن کمتر به دست آمده است بنابراین در مدل GWNBR اثر فضایی با استفاده از بیش پراکندگی کمی کاهش یافته است. در هر دو مدل نشان داده شده است که اثر فضایی در TAZ‌های مرکز شهر کمتر از سایر مناطق شهری است به طوری که در بسیاری از TAZ‌های واقع در مرکز به سمت جنوب شهر اثر فضایی نزدیک به صفر به دست آمده است که می‌توان دریافت اثر فضایی در مناطق مرکزی تأثیر کمتری در برآورد ضرایب متغیرهای مستقل داشته است. براساس مقادیر به دست آمده در جدول (۳) مدل GWNBR براساس مقادیر DIC, WAIC, RMSE (مقادیر کمتر و برازش بهتر) نیکویی برازش بهتری نسبت به مدل GWPR دارد.

برآورد فراوانی تصادف درون شهری به روش SA. استنتاج بیزی بر اساس فاصله چگالی خلفی پارامترها است که معمولاً به عنوان فاصله اعتبار بیزی (CI) شناخته می‌شود. یک ۹۵٪ CI شامل مقادیری بین ۲٫۵ و ۹۷٫۵ درصد توزیع احتمال پسین است، معمولاً برای تعیین اعتبار یک متغیر استفاده می‌شود. اگر ۹۵٪ CI یک پارامتر حاوی صفر نباشد، آن پارامتر معتبر است. یک پارامتر معتبر تأثیر مثبت (یعنی افزایشی) بر فرکانس تصادف دارد اگر دو حد از پارامتر در ۹۵٪ CI بزرگتر از صفر باشد. به طور مشابه، اگر دو حد از پارامتر در ۹۵٪ CI کمتر از صفر باشد، یک پارامتر معتبر تأثیر منفی (به عنوان مثال، کاهش) بر فرکانس تصادف دارد.

جدول (۵) نتایج مدل‌سازی برآورد فراوانی تصادفات درون شهری به روش SA را نشان می‌دهد که در آن پارامترهای که در سطح ۹۵٪ معنادار شده‌اند با رنگ قرمز برجسته شده‌اند. با در نظر گرفتن میانگین‌های خلفی متغیرهای کمکی، به طور کلی نتایج نشان داده است روابط بین متغیرهای مستقل انتخاب شده و فراوانی تصادفات با استفاده روش SA به خوبی برقرار شده است که مطالعات قبلی آن را پشتیبانی می‌کند.

در هر دو مدل، اثر فضایی (Spatial Precision) مقدار مثبت به دست آمده است که نشان می‌دهد اثر فضایی در کل محدوده مورد مطالعه مشهود است و در برآورد ضرایب

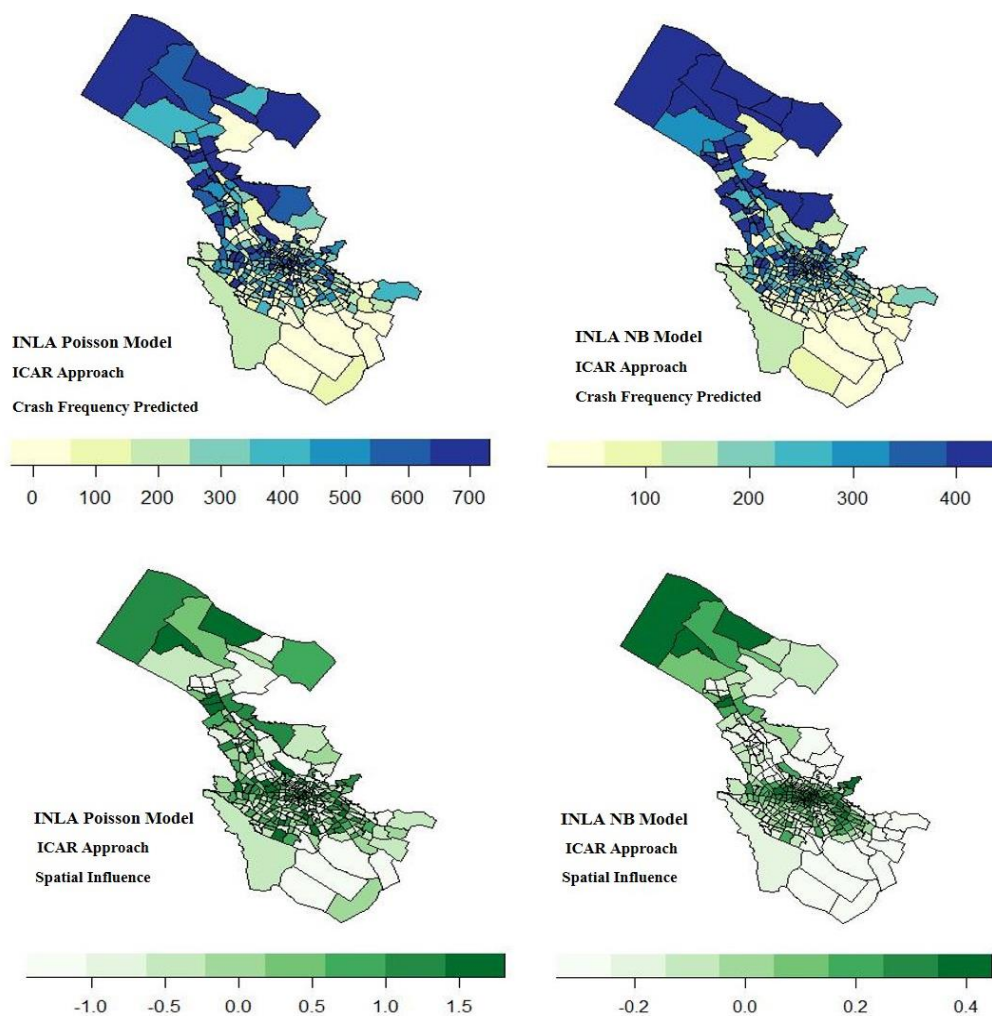
جدول ۵. نتایج مدل سازی پواسون و NB به روش INLA فضایی

Variables	PO				NB			
	Mean	SD	95% CI		Mean	SD	95% CI	
Spatial Precision	5.3561	0.6882	4.0433	6.7305	5.3561	0.6882	4.0433	6.7305
Beta0	2.9922	0.22033	2.561102	3.426433	2.9922	0.2203	2.5611	3.4264
BS	0.0442	0.00941	0.025885	0.062827	0.0442	0.009	0.0258	0.0628
AH	-0.010	0.00701	-0.02379	0.003742	-0.010	0.0070	-0.023	0.0037
AS	0.1412	0.03376	0.074868	0.207458	0.1412	0.0337	0.0748	0.2074
AL	0.22486	0.05816	0.110609	0.339025	0.22486	0.0581	0.1100	0.33902
ALE	0.00892	0.00650	-0.00388	0.021682	0.00892	0.0065	-0.003	0.02168
AG	0.0906	0.03535	0.05978	0.12097	0.0901	0.0354	0.019	0.1202
IN	0.07958	0.01436	0.051427	0.107853	0.07958	0.0143	0.0514	0.10785
PTI	-0.0499	0.12275	-0.2829	-0.009356	-0.0499	0.1227	0.082	0.1993
INT	0.0814	0.03099	0.02249	0.149252	0.0614	0.0309	0.012	0.1492
JI	0.10890	0.11606	-0.12603	0.330095	0.10890	0.116	-0.126	0.33009
LP	0.05835	0.04601	-0.03188	0.148882	0.05835	0.0460	-0.031	0.14888
Summary Statistics								
DIC		2679.51			2978.48			
WAIC		2607.25			2841.32			
Pseudo R2		0.891			0.818			
RMSE		5.380			15.32			

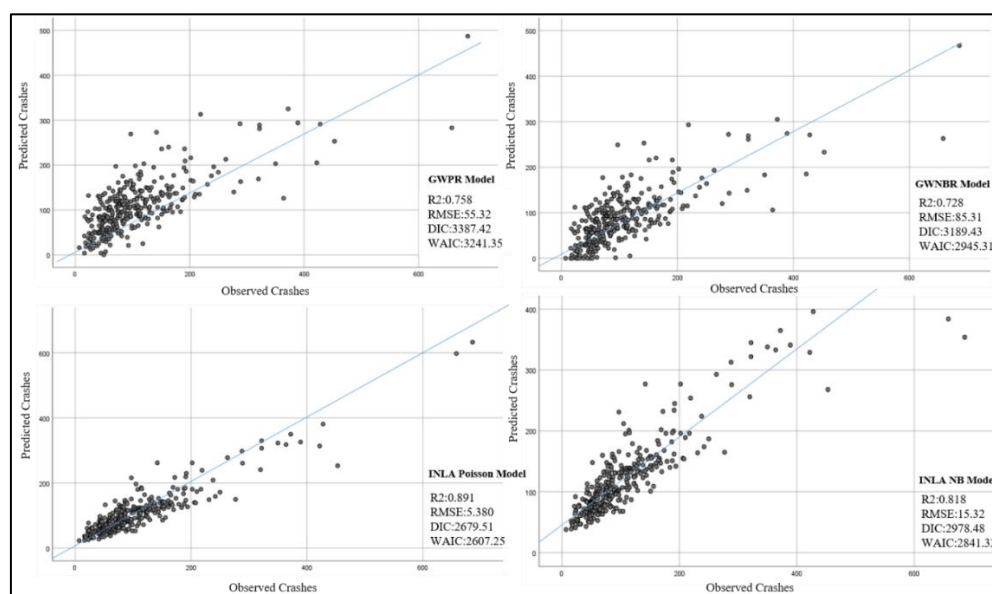
برازش مدل است. همچنین مقادیر WAIC, R2, RMSE نشان می‌دهد مدل‌های SA نتایج مناسبتری نسبت به مدل‌های مبتنی بر SW ارائه می‌کنند. اگرچه مقادیر R2 در همه مدل‌ها در بازه قابل قبولی قرار گرفته است اما مقادیر کمتر DIC و WAIC نشان داده است که مدل SAP برازش بهتری به داده‌ها داشته است و مدل مناسبتری برای برآورد فراوانی تصادفات درون شهری می‌باشد. آستانه اختلاف بین مقدار DIC در مقایسه بین مدل‌ها براساس مطالعه [23] ده در نظر گرفته شده است که در این مطالعه مقدار DIC در SAP اختلافی خیلی بیشتر از حد آسانه با سایر مدل‌ها دارد. علاوه معیارهای آماری مقایسه و ارزیابی مدل‌ها، مقادیر پیش‌بینی شده فراوانی تصادف توسط مدل‌های مبتنی بر SA نسبت به مدل‌های SW نزدیکی بیشتری به مقادیر مشاهده شده دارند که در شکل (۴) مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل‌های SA و SW مقادیر قابل قبولی است. علاوه بر آن مقایسه نقشه‌های فراوانی تصادف پیش‌بینی شده در شکل (۲) (روش SW) و شکل (۳) (روش SA) با شکل (۱) (تعداد تصادفات مشاهده شده) نشان می‌دهد فراوانی تصادفات برآورد شده به مدل SAP به مقادیر مشاهده شده نزدیکتر است.

شکل (۳) نتایج برآورد فراوانی تصادف در سطح TAZ به روش SA را نشان می‌دهد همچنین مقادیر اثر فضایی در هر یک از TAZ در برآورد مدل فراوانی تصادف نشان داده شده است. در مدل SAP بین (1- تا 1.5) در کل محدوده مورد مطالعه متغیر است. در TAZهای با رنگ سبز پر رنگ (قسمت شمال و مرکز شهر) اثر فضایی بیشتر از سایر TAZها مشاهده شده است که نشان می‌دهد برآورد فراوانی تصادفات در این نواحی تحت اثر فضایی بالا و مثبت بوده است به این معنی که اثر فضایی باعث تشدید احتمال رخداد تصادف گریده است. در حاشیه و جنوب شهر اثر فضایی نزدیک به صفر و منفی به دست آمده است، که نشان می‌دهد اثر فضایی تأثیر کاهشی بر احتمال رخداد تصادف در این نواحی داشته است. در مدل SANB نتایج مانند مدل SAP به دست آمده است (اثر فضایی مثبت در نواحی شمال و مرکز شهر) اما بازه اثر فضایی کمتر از مدل SAP است که دلیل آن می‌تواند در نظر گرفتن اثر بیش پراکندگی فضایی در SANB باشد.

مقایسه و اعتبارسنجی مدل‌ها. براساس معیارهای ارزیابی در انتهای جدول (۴ و ۵) مقادیر DIC در مدل SAP در مقایسه با سه مدل دیگر کمتر به دست آمده است که نشان دهنده نیکویی



شکل ۳ برآورد فراوانی تصادفات درون شهری و اثر فضایی متغیرهای مستقل به روش SA



شکل ۴ مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل‌های SA و SW

تصادفات درون شهری با در نظر گرفتن اثرات فضایی EIFs تصادف استفاده گردیده است. براساس نتایج مطالعه، برآورد فضایی EIFs تصادفات درون شهری در رویکرد همجواری (SA) به روش INLA نتایج بهتری را ارائه نمودند؛ به عبارتی دیگر برآورد ضرایب EIFs در روش همجواری نتایج مناسبتری نسبت به همان برآورد در روش ماتریس وزن دار جغرافیایی (SW) دارد.

مقایسه بین مدل‌های آمار فضایی SA و SW تاکنون در مطالعات گذشته مشاهده نشده است این مطالعه نشان داده شد که در نواحی درون شهری در سطح TAZ به دلیل همجواری و مرز مشترک در کل TAZ ها روش SA ضرایب EIFs را بهتر برآورد می‌کند. علاوه بر این در این مطالعه نشان داده شد اثر همجواری می‌تواند تأثیر منفی در برآورد ضرایب EIFs داشته باشد به عبارت دیگر ممکن است اثر فضایی شدت رخداد تصادف در مدل فضایی را نسبت به مدل آمار کلاسیک کاهش دهد.

در این مطالعه در هر دو روش SA و SW کاهش اثرات فضایی در برآورد ضرایب EIFs در مدل‌های SANB کاملاً محسوس بود که نشان می‌دهد در نظر گرفتن اثر بیش پراکندگی در برآورد مدل‌های SANB محدوده اثرات فضایی را کاهش داده است.

شناسایی EIFs تصادف پس از بررسی چند مرحله‌ای در این مطالعه در سطح نواحی می‌تواند یک عنصر سودمند برای تدوین سیاست‌هایی در حمایت از اقدامات کاهش تصادفات درون شهری باشد. اصلاح ویژگی‌های ایستگاه‌های اتوبوس در مکان‌های نامناسب که باعث افزایش تنش (conflict) بین وسایل نقلیه می‌گردد، زمان‌بندی مجدد چراغ‌های راهنمایی و کنترل صحیح بر اقدامات تغییرات کاربری زمین در سطح شهر از جمله اقداماتی است که می‌تواند احتمال رخداد تصادف را نواحی شهری کاهش دهد.

سیاسگزاری

محدودیت‌های تحقیق. در این مطالعه به دلیل عدم دسترسی به اطلاعات کافی و همچنین محدودیت‌های زمانی تحقیق متغیرهای مهمی که انتظار می‌رود در رخداد تصادفات درون شهری تأثیرگذار باشند مانند حجم ترافیک ورودی و خروجی به هر TAZ، سرانه مالیکت خودرو خانوار، شرایط اقتصادی افراد ساکن در هر TAZ، نسبت تعداد تصادفات با دوجرخه یا عابر، وضعیت روسازی و لغزندگی و بازه سنی و تحصیلات افراد درگیر تصادف در نظر گرفته نشده است بنابراین انتظار می‌رود در مطالعات آینده ضمن بررسی میزان اثر هم‌خطی بین متغیرهای مستقل تأثیرگذار در برآورد فراوانی تصادف به روش چندعاملی فضایی، اثر فضایی هر یک از متغیرهای مذکور در برآورد فراوانی تصادفات درون شهری در نظر گرفته شود.

بحث و نتیجه‌گیری

این مطالعه به منظور بررسی اثر فضایی EIFs تصادفات درون شهری با استفاده از روش‌های آمار فضایی مبتنی بر فاصله اقلیدسی ماتریس وزن جغرافیایی (SW) و روش‌های مبتنی بر فاصله و همجواری (SA) انجام گرفته است. در گام اول مطالعه تمامی متغیرهای در دسترس جمع‌آوری گردید و با توجه به مطالعات گذشته فشرده‌سازی داده‌ها به منظور کاهش اثر هم‌خطی و خود هم‌بستگی بین متغیرهای مستقل به روش PCA انجام گرفت. در روش PCA شاخص‌های تنوع کاربری، دسترسی به سیستم حمل و نقل عمومی و دسترسی به مشاغل به عنوان دسته‌های عوامل محیطی غیر مستقیم در مدل‌سازی وارد گردید.

در تمامی مدل‌ها، مقادیر تعداد ایستگاه اتوبوس، متوسط سرعت، متوسط زمان چراغ سبز و همچنین شاخص تنوع نوع کاربری به عنوان مهمترین EIFs تصادف شناسایی شده‌اند که میزان اثر EIFs تصادف، براساس مقدار ضرایب به دست آمده به دلیل وجود اثر فضایی در هر TAZ متفاوت است بنابراین با کنترل این عوامل متناسب با مقدار آن در هر TAZ می‌توان اثر فضایی EIFs تصادف را در آن TAZ کاهش داد.

در این مطالعه از ۴ مدل آمار فضایی GWNBR، GWPR، SANB و SAP مبتنی بر فاصله اقلیدسی و مدل‌های INLA جهت برآورد فراوانی

مراجع

1. N.M. Zafri & A. Khan, "A spatial regression modeling framework for examining relationships between the built environment and pedestrian crash occurrences at macroscopic level: a study in a developing country context," *Geography and sustainability*, vol. 3, no. 4, pp.312-324, (2022).
2. M. Umair, I.A. Rana & R.H Lodhi, "The impact of urban design and the built environment on road traffic crashes: a case study of Rawalpindi, Pakistan," *Case studies on transport policy*, vol. 10, no. 1, pp.417-426, (2022).
3. P. Chen & J. Zhou, "Effects of the built environment on automobile-involved pedestrian crash frequency and risk," *Journal of Transport & Health*, vol. 3, no. 4, pp. 448-456, (2016).
4. N.M. Zafri, A.A. Prithul, I. Baral & M. Rahman, "Exploring the factors influencing pedestrian-vehicle crash severity in Dhaka, Bangladesh," *International journal of injury control and safety promotion*, vol. 27, no. 3, pp. 300-307, (2020).
5. S.A Almasi & H.R. Behnood, "Exposure based geographic analysis mode for estimating the expected pedestrian crash frequency in urban traffic zones; case study of Tehran," *Accident Analysis & Prevention*, pp. 168-179, Apr 4-11, (2022).
6. L. Fuentes, R. Truffello & M. Flores, "Impact of Land Use Diversity on Daytime Social Segregation Patterns in Santiago de Chile," *Buildings*, vol. 12, no. 2, pp.149, (2022).
7. C.D. Kang , "The S+ 5Ds: Spatial access to pedestrian environments and walking in Seoul, Korea," *Cities*, vol. 77, no. 3, pp. 130-141, (2018).
8. M. Lake & L. Ferreira, "Towards a methodology to evaluate public transport projects", 2002.
9. S.H. Yoon, Y.W. Kim & Y.G. Ji, "The effects of takeover request modalities on highly automated car control transitions," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 123, no. 1, pp. 150-158, (2019).
10. T. Chen, N. Sze, S. Chen, S. Labi & Q. Zeng, "Analysing the main and interaction effects of commercial vehicle mix and roadway attributes on crash rates using a Bayesian random-parameter Tobit model," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 154, no. 1, pp. 8-15,(2021).
11. A.P. Tarko, "Maximum likelihood method of estimating the conflict-crash relationship," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 179, no. 1, pp. 12-19, (2023).
12. M.H. Rashidi, S. Keshavarz, P. Pazari, N. Safahieh & A. Samimi, "Modeling the accuracy of traffic crash prediction models," *IATSS Research*, vol. 46, no. 3, pp. 345-352, (2022).
13. M. Moomen, M. Rezapour, M. Raja & K. Ksaibati, "Predicting downgrade crash frequency with the random-parameters negative binomial model: Insights into the impacts of geometric variables on downgrade crashes in Wyoming," *IATSS Research*, 44(2), vol. 44, no. 2, pp. 94-102, (2020).
14. H. Tang & E.T. Donnell, "Application of a model-based recursive partitioning algorithm to predict crash frequency," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 132, no. 1, pp. 105-116, (2019).
15. H. Huang, Q. Zeng, X. Pei, S. Wong & P. Xu, "Predicting crash frequency using an optimised radial basis function neural network model," *Transportmetrica A: transport science*, vol. 12, no. 2, pp. 330-345, (2016).

16. M. Zarei, B. Hellinga & P. Izadpanah, "CGAN-EB: A non-parametric empirical Bayes method for crash frequency modeling using conditional generative adversarial networks as safety performance functions," *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 35-46, (2022).
17. S.A. Almasi, H.R. Behnood & R. Arvin, "Pedestrian crash exposure analysis using alternative geographically weighted regression models," *Journal of advanced transportation*, vol. 2021, no. 1, pp. 50-63, (2021) .
18. A.K. Al-Aamri, G. Hornby, L.C. Zhang, A.A. Al-Maniri & S.S. Padmadas, "Mapping road traffic crash hotspots using GIS-based methods: A case study of Muscat Governorate in the Sultanate of Oman," *Spatial Statistics*, 42, vol. 42, no. 1, pp. 78-85, (2021) .
19. J. Liu, A. Hainen, X. Li, Q. Nie & S. Nambisan, "Pedestrian injury severity in motor vehicle crashes: an integrated spatio-temporal modeling approach," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 132, no. 3, pp. 105-117, (2019).
20. A.E. Iyanda, R. Adeleke, Y. Lu, T. Osayomi, A. Adaralegbe, M. Lasode & A. M. Osundina, "A retrospective cross-national examination of COVID-19 outbreak in 175 countries: a multiscale geographically weighted regression analysis," *Journal of infection and public health*, vol. 13, no. 10, pp.1438-1445, (2020).
21. Y. Zhou, X. Jiang, C. Fu, H. Liu & G. Zhang, "Bayesian spatial correlation ,heterogeneity and spillover effect modeling for speed mean and variance on urban road networks," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 174, no. 3, pp. 103-110, (2022).
22. U. Galgamuwa, J. Du & S. Dissanayake, "Bayesian spatial modeling to incorporate unmeasured information at road segment levels with the INLA approach: A methodological advancement of estimating crash modification factors," *Journal of traffic and transportation engineering (English edition)*, vol. 8, no. 1, pp.95-106, (2021).
23. D. Saha, P. Alluri, A. Gan & W. Wu, "Spatial analysis of macro-level bicycle crashes using the class of conditional autoregressive models," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 118, no. 1, pp. 166-177, (2018).
24. K.M. Peera, R.S. Shekhawat & C. Prasad, "Traffic analysis zone level road traffic accident prediction models based on land use characteristics," *International journal for traffic and transport engineering (Belgrade)*, vol. 9, no. 4, pp. 376-386, (2019).
25. H. Sung, S. Lee, S. Cheon & J. Yoon, "Pedestrian Safety in Compact and Mixed-Use Urban Environments: Evaluation of 5D Measures on Pedestrian Crashes," *Sustainability*, vol. 14, no. 2, pp.646, (2022).
26. F. Guo & D. Lu, "How many crashes does cellphone use contribute to? Population attributable risk of cellphone use while driving," *Journal of safety research*, vol. 82, no. 4, pp. 385-391, (2022).
27. M. Rahmani, A. Lotfata, E. Zebardast, S. Rastegar, T.W. Sanchez, B.A. Goharrizi & S. Landi, "Land use suitability assessment for economic development at the provincial level: The case study of Yazd Province, Iran," *Sustainable Cities and Society*, vol. 87, no. 1, pp. 104-112, (2022).
28. X. Delclòs-Alió & C. Miralles-Guasch, "Looking at Barcelona through Jane Jacobs's eyes: Mapping the basic conditions for urban vitality in a Mediterranean conurbation," *Land Use Policy*, vol. 75, no. 1, pp. 505-517, (2018).
29. U. Olsson, "Generalized linear models: an applied approach: Lund," Student litteratur, (2002).
30. A. R. da Silva & A.S. Fotheringham, "The multiple testing issue in geographically weighted regression," *Geographical Analysis*, 48(3), vol. 48, no. 3, pp.233-247, (2016).

31. L. Barmoudeh, H. Baghishani & S. Martino, "Bayesian spatial analysis of crash severity data with the INLA approach: Assessment of different identification constraints," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 167, no. 1, pp. 106-118, (2022).
32. D. Mukherjee, K.R. Rao & G. Tiwari, "Built-environment risk assessment for pedestrians near bus-stops: a case study in Delhi," *International journal of injury control and safety promotion*, vol. 30, no. 2, pp.185-194, (2022).
33. J. Su, N. Sze & L. Bai, "A joint probability model for pedestrian crashes at macroscopic level: Roles of environment, traffic, and population characteristics," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 150, no. 1, pp. 105-113, (2021).
34. D. Rojas-Rueda, M.J. Nieuwenhuijsen, H. Khreis & H. Frumkin, "Autonomous vehicles and public health," *Annual review of public health*, vol. 41, no. 1, pp.329-345, (2020).
35. J. Stipancic, L. Miranda-Moreno, N. Saunier & A. Labbe, "Network screening for large urban road networks: using GPS data and surrogate measures to model crash frequency and severity," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 125, no. 2, pp. 290-301, (2019).
36. P. Álvarez, M. A. Fernández, A. Gordaliza, A. Mansilla & A. Molinero, "Geometric road design factors affecting the risk of urban run-off crashes," *A case-control study. PLoS one*, vol. 15, no. 6, pp.50-64, (2020).
37. J. Lee, M. Abdel-Aty & I. Shah, "Evaluation of surrogate measures for pedestrian trips at intersections and crash modeling," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 130, no. 1, pp. 91-98, (2019).



Investigating Progressive Collapse of Knee Braced Frame in Steel Structures under Fire Loading

Research Article

Marzieh Akbari¹, Ali Mohammad Roustae² , Ali Alipour Mansourkhani³, Hamed Enayati⁴

DOI: [10.22067/jfcej.2023.80437.1207](https://doi.org/10.22067/jfcej.2023.80437.1207)

1. Introduction

Progressive collapse like a chain reaction with the spread of an initial local damage inside the structure causes partial or total damage of the structure. The high heat caused by the fire in steel structures increases the load capacity of the members to a large extent, the result of which is progressive destruction and collapse of the structure. Engineers and researches have paid attention to this issue since part of the Ronan Point building in London was damaged in 1968. After the destruction of the World Towers in 2001 on September 11, several research institutes convened to correct this situation and achieve design methods against progressive collapse. Direct and indirect design methods can be used for designing the structure against progressive collapse. So far, many studies have been conducted on steel structures under fire load, but most of the studies on bracing structures with knee braces have been under earthquake load. Roudrigues et al. (2000) published the result of a series of 168 fire resistance tests on compression steel members with limited thermal tension. Crosti (2009) investigated the steel structure of a one-story steel-framed parking under fire load. Piers et al. (2010) at the University of Coimbra presented a comparison of fire behavior in H and CHS steel columns with limited thermal expansion. Parvini et al. (2016) investigated the behavior of the moment-resisting frame system with knee braces under the risk of progressive collapse because of gravity and seismic loads. Cao et al. (2023) investigated the progressive failure of steel structure under the influence of fire load and studied the impacts of load ratio and resistance of structural members on the behavior of the structure.

2. Method

The nonlinear analysis of 3, 6, and 9-story steel frame structures with knee braces under fire load was done using Abaqus software. The purpose of the analysis in Abaqus software is to determine the elements and a range of frames that have the most critical condition under fire loading. By identifying these elements, based on their prioritization, and using SAP2000 software, the critical load-bearing elements that are usually columns and braces in the braced frame system were removed to evaluate the behavior of the sample frames under the effect of progressive collapse caused by fire and to determine the critical condition for the frames with coaxial and off-axial knee braces. Column sections were of IPB or box type, beam sections were of single or double IPE type or plate grader, and brace sections were of double channel section type. Knee element would be also better to be chosen from thin sections with low number and hardness and high ductility. The steel material for the structures was ST37 type. The soil studied for the structures was type III, and the structure importance factor was also checked for buildings with medium importance of $I=1$.

3. Results and discussion

At first, the 3-story frame with coaxial knee brace was modeled in Abaqus software and analyzed under fire load. As Figure 1 shows, the middle column and two columns on both sides of the first floor have more thermal stresses.

In the SAP software, the focus was on the mentioned columns and they were removed one by one and the behavior of the frame was evaluated. Figure 2 shows the energy-time curve of the frame during the fire time.

*Manuscript received: January 6, 2023, Revised, November May 31, 2023, Accepted, June 23, 2023.

¹. MSc Student in Structural Engineering, Faculty of Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.

².Corresponding author. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.

Email: arousta@yu.ac.ir

³. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.

⁴. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Mazandaran, Iran.

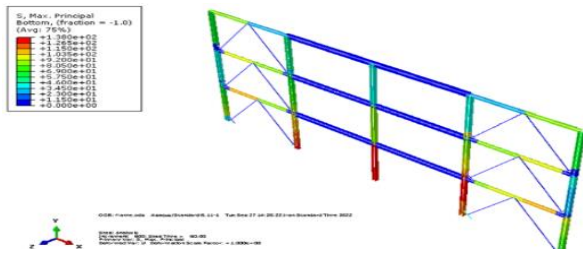


Figure 1. Thermal stress distribution in a 3-story frame with coaxial knee brace under fire load

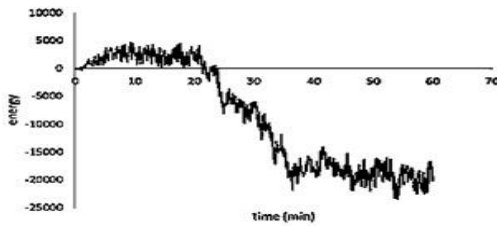


Figure 2. Energy-time curve of 3-story frame with coaxial knee brace under fire load

The results showed that for the frame with off-axial knee brace, only the middle column had critical conditions. It can be said that the steel frame with off-axial brace has high ductility. This problem, in combination with the knee element, leads to a significant increase in the plasticity of the frame. The thermal analysis for the 6-story frame with coaxial knee brace showed that the middle column and the columns on both sides in the first floor and the middle column in the second floor are in critical condition. According to the results obtained from the analysis of the 6-story frame with off-axial knee brace, the stresses generated in the middle column on the first floor and its right column and then the middle column on the second floor caused them to become more critical. Figure 3 shows the comparison of the energy of the 6-story frame with coaxial and off-axial knee bracing for different scenarios without and with column removal.

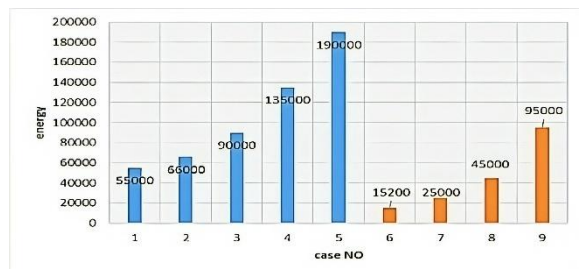


Figure 3. The comparison of the energy of the 6-story frame with coaxial and off-axial knee bracing for different scenarios

The analysis performed on the 9-story frame with coaxial and off-axial knee bracing showed that the off-axial bracing had a very significant impact on reducing the energy of the frame compared to the coaxial bracing system. The amount of energy in off-axis brace is reduced by 65%, which is very favorable. However, the 9-story frame itself has high ductility, which in combination with

the off-axis brace and knee element, results in a structural system with ductility and the ability to absorb and dissipate energy very well.

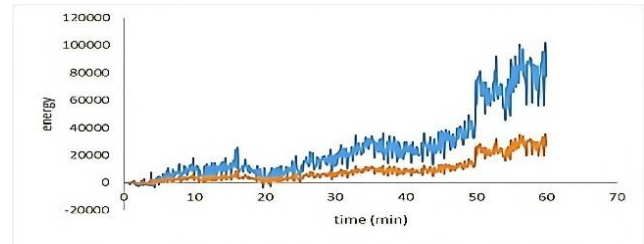


Figure 4. Energy-time curve of 9-story frame with coaxial and off-axial knee brace under fire load

The results of the 9-story frame with coaxial and off-axial knee braces showed that the middle column in the first and second floors has the most critical conditions.

4. Conclusion

1. The results obtained from the 3-story frame for the frame with off-axial knee brace showed that the amount of energy for the case where the middle column is removed has increased by about 10%. The energy of the frame with off-axial knee braces is more than the energy of the frame with coaxial knee braces, but the removal of the column in the frame with off-axial knee braces has only increased the energy by 10%. This is despite the fact that removing the column in the frame with the coaxial knee brace has increased the energy 2.3 times, and for this reason, the frame with the off-axial knee brace is much more desirable.
2. The results of the analysis of 6-story coaxial and off-axial knee brace frames showed that the energy in the frame with the off-axial knee brace was about 50% less than the frame with the coaxial knee brace during the fire and in the entire time period.
3. The results of the 9-story frame showed that in total, in the case of using the off-axial knee brace, energy for without removing the element, removing the middle column in the first floor, and removing the middle column in the first and second floors in comparison by using the coaxial knee brace, decreased 77%, 70%, and 79%, respectively, which is very significant.



بررسی فروریختگی پیش‌رونده قاب‌های مهاربندی شده با بادبند زانویی در سازه‌های فولادی تحت بار آتش‌سوزی*

مقاله پژوهشی

حامد عنایتی^(۴)

علی‌پور منصورخانی^(۳)

علی محمد روستا^(۲)

مرضیه اکبری^(۱)

DOI: 10.22067/jfeci.2023.80437.1207

چکیده در این تحقیق به بررسی فروریختگی پیش‌رونده قاب‌های مهاربندی شده با بادبند زانویی در سازه‌های فولادی تحت بار آتش‌سوزی بر اساس روش مدل‌سازی نرم‌افزاری پرداخته شد. به منظور انجام تحقیق قاب‌های فولادی ۳ و ۶ و ۹ طبقه، با سیستم بادبندی زانویی هم‌محور و برون‌محور به شکل هشتی در نظر گرفته شد و با استفاده از روش نرم‌افزاری SAP و ABAQUS تحلیل و بررسی گردید. در این خصوص در ابتدا با مدل‌سازی قاب‌ها در نرم‌افزار SAP قاب‌ها تحلیل و طراحی گردید و مقاطع قاب‌ها مشخص شد. در ادامه قاب در نرم‌افزار ABAQUS تحت بار آتش‌سوزی تحلیل شد. سپس بعد از مشخص شدن المان‌های بحرانی، مجدداً در نرم‌افزار SAP قاب بدون و با حذف المان‌های بحرانی به صورت پی‌درپی تحت بار حریق تحلیل شد تا میزان انرژی نمونه قاب‌ها در هر حالت بررسی و مقایسه شود. براساس مطالعه انجام شده بر روی قاب با بادبند زانویی برون‌محور و هم‌محور مشخص گردید که نوع بادبند برون‌محور تأثیر بسیار قابل توجهی را بر کاهش انرژی قاب در مقایسه با سیستم بادبندی هم‌محور داشته است. قاب‌های ۳ و ۶ و ۹ طبقه با بادبند برون‌محور زانویی، انرژی به ترتیب در حدود ۳۵ و ۵۰ و ۶۵ درصد کمتر از قاب با بادبند هم‌محور زانویی را در خلال وقوع حریق و در بازه زمانی کل آن داشته است.

واژه‌های کلیدی فروریختگی پیش‌رونده، سازه فولادی، بادبند زانویی، بار آتش‌سوزی، استهلاک انرژی.

Investigation of Progressive Collapse of Knee Braced Frame in Steel Structures under Fire Loading

Marzieh Akbari

Ali Mohammad Roustaa

Ali Alipour Mansourkhani

Hamed Enayati

Abstract In this research, the progressive collapse of braced frames with knee braces in steel structures under fire load was investigated based on the software modeling method. In order to carry out the research 3, 6 and 9-story steel frames with coaxial and off-axis knee bracing systems were considered in the shape of inverted-V and were analyzed and analyzed using the software method and ABAQUS and SAP software. In this regard, at first, the frames were analyzed and designed by modeling the frames in SAP software, and the sections of the frames were determined. In the following, the frame was analyzed in ABAQUS software under the fire load. the frame without and with the removal of the critical elements was analyzed successively under the fire load in the SAP software to check and compare the energy of the frame samples in each case based on the results obtained from the analysis. Based on the study conducted on the frame with off-axis and coaxial knee bracing, it was determined that the bracing type of off-axis had a significant effect on reducing the energy of the frame compared to the coaxial bracing system. The 3, 6 and 9-story frames with off-axis knee bracing had 35%, 50% and 65% less energy than the frames with coaxial knee braces during the fire and in the entire time period.

Key Words Progressive Collapse, Steel Structure, Knee Brace, Fire Load, Energy Dissipation

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۰/۱۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۴/۳ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج.

(۳) استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه یاسوج.

(۴) استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه علم و فناوری مازندران.

Email: aroosta@yu.ac.ir

مقدمه

تخریب پیش‌رونده به مثابه یک واکنش زنجیره‌ای با گسترش یک آسیب موضعی اولیه در درون سازه، باعث از هم فروپاشیدن جزئی و یا کلی سازه می‌شود. در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در رابطه با خرابی سیستم‌های سازه‌ای صورت گرفته است. این مطالعات، اهمیت پدیده خرابی پیش‌رونده را، که از بارگذاری غیرعادی مانند ضربه ناشی از برخورد وسیله نقلیه با سازه، زمین‌لرزه، انفجار، آتش‌سوزی و... ناشی می‌شود مشخص می‌کند. در اسناد دولتی آمریکا راهبردهایی برای طراحی در مقابل گسیختگی پیش‌رونده، جهت کاهش و یا جلوگیری از وقوع خرابی پیش‌رونده ارائه شده است. در خرابی پیش‌رونده سازه فولادی، خرابی موضعی یک عضو منجر به تغییر شکل‌های قابل توجهی می‌شود که در نهایت انهدام سازه را به همراه دارد که یکی از نمونه‌های آن در کشور ساختمان پلاسکو است. حرارت بالای ناشی از آتش در سازه فولادی باعث می‌شود تا باربری اعضا به طور عمومی و تا حد زیادی کاهش یابد و در نتیجه به راحتی منجر به تخریب پیش‌رونده و فروریختن سازه شود. توجه مهندسان و پژوهشگران بعد از آسیب‌دیدگی بخشی از ساختمان رونان پوینت در لندن در سال ۱۹۶۸ به این موضوع جلب شد. بعد از حادثه تخریب برج‌های جهانی در سال (۲۰۰۱) چندین مؤسسه تحقیقاتی برای اصلاح این وضعیت و به دست آوردن روش‌های طراحی در برابر خرابی پیش‌رونده تشکیل جلسه دادند و توجه ویژه‌ای به موضوع خرابی پیش‌رونده در سازه‌های مهم صورت گرفت. مؤسسه‌های تحقیقاتی به این نتیجه رسیدند که ساختمان‌ها باید طوری طراحی شوند که بتوانند خرابی موضعی را با پخش کردن انرژی و توزیع در بقیه اعضا، یعنی همان پیدا کردن مسیر جایگزین کنترل کنند [1]. دو روش کلی طراحی مستقیم و غیرمستقیم برای طراحی سازه در برابر تخریب پیش‌رونده وجود دارند. روش‌های مقاوم‌سازی محلی ویژه و مسیر بار جایگزین، از انواع روش‌های طراحی مستقیم است و روش نیروی هم‌بند از روش‌های طراحی غیر مستقیم است [2]. در استانداردهای انگلیس برای جلوگیری از خرابی پیش‌رونده از سه روش طراحی نیروی هم‌بند، مسیر بار جایگزین و روش مقاوم‌سازی محلی ویژه استفاده می‌گردد [3].

پژوهش‌های پیشین

تا به امروز مطالعات زیادی در رابطه با سازه‌های فولادی تحت بار آتش‌سوزی صورت گرفته است. اما بیشتر مطالعات در مورد سازه مهاربندی با بادبند زانویی تحت بار زلزله بوده است. رودریگز و همکاران [4] نتایج مجموعه‌ای از ۱۶۸ آزمایش مقاومت در برابر آتش را روی عناصر فولادی فشرده با کشش حرارتی محدود منتشر کردند. علی و همکاران [5] حالت‌های سقوط در یک قاب یک طبقه را بررسی کردند. آنها دو مد فروپاشی درونی در اثر عمل زنجیره‌ای تیرهای گرما دیده و فروپاشی بیرونی ناشی از انبساط حرارتی تیرهای گرمادیده را معرفی کردند. رفتار شاه تیرها در برابر آتش نقش تعیین کننده‌ای در دو مدل خرابی دارد. کراستی [6]، سازه فولادی یک پارکینگ عرشه باز با قاب فولادی یک طبقه را زیر بار آتش مورد بررسی قرار داد. پیرز و همکاران [7] در دانشگاه کویمبرا مقایسه‌ای از رفتار در برابر آتش در ستون‌های فولادی H و CHS با افزایش حرارتی محدود ارائه دادند. اثرات سطح بار، لاغر بودن و شکل مقطع بررسی شد. بر اساس نتایج، سطح بار، تأثیر زیادی بر عملکرد آتش‌سوزی و مقاومت ستون دارد. افزایش سطح بار، منجر به کاهش دما و زمان بحرانی ستون می‌شود. لاغری ستونها نیز، تأثیر به‌سزایی دارد. با افزایش لاغری دمای بحرانی کاهش می‌یابد. نوع مقطع، تأثیر خیلی جزئی در عملکرد و مقاومت در برابر آتش در ستون‌ها داشت. برای ستون‌های با یک سطح بار و مقادیر لاغری مشابه، دما و زمان بحرانی عملاً یکسان بود. جلال و الساوی [8] در مورد استراتژی‌های مختلف در فروریختگی‌های پیش‌رونده در قاب‌های فلزی طراحی شده برای بار ثقیلی را بررسی کردند. پاسخ آنالیز دینامیکی غیرخطی سه بعدی برای سازه‌های ۱۰ طبقه با طول دهانه‌های متفاوت با وضعیتی که ستون‌های متفاوت حذف شوند را مقایسه کردند. مشخص شد که نوع بارگذاری بر فروریختگی تأثیر به‌سزایی دارد. همچنین افزایش استحکام تیرها بسیار مؤثرتر از افزایش سختی است. حقایق، روحانی‌منش و مارنانی [9] به بررسی رفتار قاب فولادی با مهاربند زانویی در برابر زلزله و مقایسه آن با مهاربند ضربدری و شورون پرداختند. در محاسبه ضریب رفتار مدل‌های تحلیلی قاب‌های فولادی مهاربندی شده با مهاربند زانویی، ضربدری و شورون مشخص‌گردید که، علاوه بر اینکه سیستم سازه‌ای مؤثر بر

ارزیابی قرار دادند. با مقایسه مدل‌ها مشاهده گردید که سازه در حالت حذف ستون کناری نسبت به ستون گوشه بحرانیتر است. همچنین مشاهده گردید که تفاوت چندانی بین پاسخ سیستم‌های جانبی مختلف در برابر خرابی پیش‌رونده وجود ندارد. کردباغ و محمدی [16] به اثرات چشمه اتصال در مقاومت در برابر سقوط پیش‌رونده قاب‌های فولادی پرداختند. طبق مطالعات، ستون گوشه یا ستون میانی سازه، بلافاصله از مدل خارج شد و فروپاشی تدریجی قاب‌ها با تجزیه و تحلیل دینامیکی غیرخطی ارزیابی شد. نتایج به دست آمده به طور خلاصه نشان داد که در نظر گرفتن اثرات چشمه اتصال، باعث افزایش دوران عضو در اتصالات شده و چرخش پلاستیک عناصر و جابه‌جایی عمودی در بالای ستون حذف شده در سازه را افزایش می‌دهد و در نتیجه احتمال سقوط پیش‌رونده را افزایش خواهد داد. محمد و همکاران [17]، یک شاخص از درجه نامعینی سازه را برای ارزیابی توانایی سازه برای حفظ پایداری آن در طول بارگذاری غیرعادی پیشنهاد دادند. اورتن و همکاران [18]، پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) را در بهبود تداوم تیرهای بتن مسلح، برای توزیع مجدد بار تحمیل شده، توسط ستون آسیب‌دیده به یک منطقه سالم، برای کنترل انتشار فروپاشی پیش‌رونده پیشنهاد دادند. آنها در تیرهای دارای آرماتورهای ناپیوسته، بهبودی در حدود ۵۵٪ - ۶۰٪ را ثبت کردند. کفاش، کرم‌الدین و مقیمان [19] رفتار قاب‌های مهاربندی همگرای ویژه فولادی تحت بار آتش پس از زلزله را بررسی کردند. با مقایسه نتایج مقاومت آتش‌سوزی پس از زلزله سازه تحت رکوردهای مختلف نشان داد که در اثر موارد اعمال رکوردهای مختلف، اختلاف قابل توجهی در مقاومت آتش‌سوزی پس از زلزله ایجاد نکرده است. محمدی و همکاران [20] تخریب پیش‌رونده در سازه‌های قاب خمشی فولادی در مطالعه چند پارامتری بررسی کردند. با مطالعه سازه‌های ۴ و ۸ و ۱۲ طبقه قاب خمشی در OPEN SEES به این نتیجه رسیدند که با کاهش طبقات آسیب‌پذیری بیشتر می‌شود. کائو و همکاران [21] خرابی پیش‌رونده در سازه فولادی تحت تأثیر بار آتش را بررسی کردند و تأثیر نسبت بار و مقاومت اعضای سازه بر رفتار سازه مطالعه کردند. سه حالت فروپاشی جانبی و فروپاشی رو به پایین و فروپاشی ترکیبی جانبی-پایین را تحقیق کردند.

ضریب رفتار سازه می‌باشد؛ هندسه سازه، ابعاد سازه، تعداد طبقات و همچنین نحوه طراحی اعضا بر این پارامتر مؤثر می‌باشند. هرشاد دی‌محال [10] روش مطالعه تأثیر آتش بر روی سازه فولادی را ارائه کرد. براساس نتایج با بروز آتش‌سوزی در زیر ستون‌ها به علت رخداد پدیده کماتش در ستون یک وضعیت بحرانی در سازه ایجاد می‌شود و ستون تحمل بار ایجاد شده را ندارد و به سرعت افت می‌کند. پارامترهایی مانند لاغری، خارج از مرکز بودن بار و سختی سازه، مورد آزمایش قرار گرفتند. نشان داده شد که در مورد عناصر با بارگذاری متمرکز، هر چه سختی ساختار اطراف بیشتر باشد، دمای بحرانی پایینتر است. پروینی و سعادت‌مند [11] با هدف بررسی رفتار سیستم قاب خمشی با استفاده از مهاربند زانویی، در معرض خطر فروریختگی پیش‌رونده تحت بارهای ثقلی و لرزه‌ای تحقیقی را ارائه کردند. نتایج تجزیه و تحلیل پوش‌داون نشان می‌دهد که ظرفیت سقوط پیش‌رونده تحت بار جاذبه، در قاب‌های مهاربند زانویی ظرفیت بیشتری نسبت به قاب‌های مهاربند هم مرکز دارد. با توجه به نتایج تجزیه و تحلیل دینامیک تاریخیچه زمانی، سازه‌های دارای قاب با مهاربند همگرا و مهاربند زانویی، از پتانسیل زیادی در سناریوی سقوط پیش‌رونده لرزه‌ای برخوردار هستند. کیم و همکاران [12] تأثیر عملکرد زنجیره‌ای بر پتانسیل فروریختگی پیش‌رونده در ساختمان‌های قاب خمشی فولادی را مورد بررسی قرار دادند. لو و همکاران [13]، رفتار ساختمان با سازه بتن مسلح را بررسی کردند و مشاهده کردند که وجود هسته مرکزی میزان نامعینی سازه را افزایش می‌دهد و مسیرهای مختلفی را فراهم می‌کند که می‌تواند بارهای بر روی ستون‌های آسیب‌دیده را به مناطق سالم انتقال دهد. عبدالله زاده و شالیکار [14] اثر مقاوم‌سازی یک قاب مقاوم خمشی فولادی (MRF) با مهاربند ضربدری و V معکوس را بررسی کردند. مقایسه عملکرد بین مهاربند V معکوس و قاب با سیستم مهاربندی ضربدری، نشان می‌دهد که سیستم‌های مهاربندی V معکوس حدود ۱۰٪ شکل‌پذیری بالاتری را نشان می‌دهند. روح‌اله راه‌نورد و نوید سیاه‌پلو [15] با استفاده از روش اجزای محدود و با به‌کارگیری نرم‌افزار ABAQUS ساختمان ۲۰ طبقه فولادی، با دو نوع سیستم سازه‌ای قاب خمشی و قاب خمشی به همراه مهاربند همگرا و دو نوع سناریوی حذف ستون گوشه و کنار را مورد

ضرورت تحقیق

هدف اصلی این پژوهش ارزیابی رفتار قاب‌های فولادی مهاربندی شده با سیستم بادبند زانویی تحت اثر گسیختگی پیش‌رونده ناشی از بار آتش‌سوزی یا حریق می‌باشد که بالطبع رفتار قاب‌های فولادی به پارامترهای مختلفی مانند ارتفاع سازه، زمان تداوم حریق و... بستگی داشته که مسئله را از حالت کلی به صورت مطالعات پارامتری تبدیل می‌سازد.

بر این اساس می‌توان هدف اصلی تحقیق را در چند بخش مختلف خلاصه نمود: (۱) آنکه مشخص گردد که تحت بار آتش سوزی چه محدوده و المان‌هایی از قاب تسلیم شده (بر اساس تحلیل حرارتی نمونه‌ها)، (۲) در ادامه حذف المان‌های قاب انجام شود (المان‌هایی که براساس تحلیل انجام شده تسلیم گردیده) تا رفتار قاب تحت اثر گسیختگی پیش‌رونده تحقیق گردد. در نتیجه حالت بحرانی حذف المان (المان‌ها) تحت اثر بار حریق محقق شود. (۳) سپس به بررسی تأثیر زمان تداوم حریق بر رفتار قاب تحت اثر گسیختگی پیش‌رونده (حالت بحرانی نتیجه شده از بررسی حالت دوم) پرداخته می‌شود که مرحله سوم کار می‌باشد. (۴) در نهایت و در مرحله آخر مقایسه‌ای بین قاب‌های فولادی تحت اثر گسیختگی پیش‌رونده (حالت بحرانی نتیجه شده از بررسی حالت دوم) با مهاربندهای هم‌محور و برون‌محور بدون المان زانویی و با المان زانویی انجام می‌گردد و تأثیر المان زانویی بر نتایج تحقیق می‌شود. این چهار بخش بدنه و اساس کار تحقیق را تشکیل می‌دهد که با استفاده از مدل‌سازی نرم‌افزاری انجام می‌گردد. برخی اهداف فرعی و مهم این تحقیق نیز عبارتند از:

(الف) نحوه استخراج و معرفی تابع حریق و اعمال بار آتش‌سوزی در نرم‌افزارهای مورد استفاده.

(ب) بررسی چگونگی تأثیر زمان دوام آتش‌سوزی بر نتایج به عنوان یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار بر نتایج.

(پ) بررسی نکات و ملزومات مدل‌سازی نمونه‌ها و تحلیل آنها به خصوص مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس، نوع المان‌ها و تقسیم‌بندی آنها و سایر شرایط مرزی تأثیرگذار بر نتایج.

نتایج این تحقیق می‌تواند مورد توجه و استفاده بخش‌های مختلف و فعال در صنایع مختلف اعم از صنایع نظامی، مراکز مطالعاتی، تحقیقاتی، آکادمیک، دانشگاهی و سازمان‌های دولتی و خصوصی فعال در ساخت و ساز سازه‌های مختلف و از

جمله پروژه‌های عمرانی و دانشجویان و اساتید و محققان قرار گیرد. از جمله مهمترین کاربردهای نتایج این تحقیق را می‌توان در خصوص طراحی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها در برابر بار آتش‌سوزی دانست که در کشور ما شاید تا به امروز کمتر به آن توجه شده است. لیکن وقوع حوادثی از جمله آتش‌سوزی در ساختمان پلاسکو و... را باید به عنوان نمونه و زنگ خطری دانست که توجه به کنترل و طراحی سازه‌ها در برابر بار آتش‌سوزی را مانند طراحی لرزه‌ای آنها با اهمیت سازد.

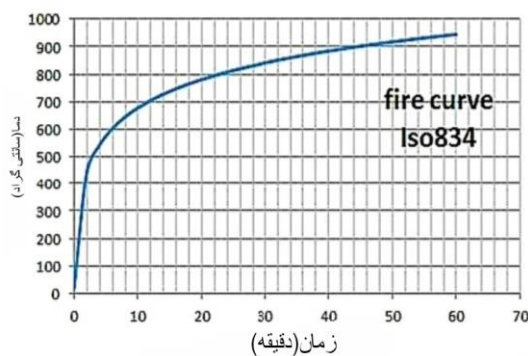
شبیه‌سازی

در این پژوهش به تحلیل سازه‌های فولادی قابی شکل با مهاربند زانویی تحت بار آتش در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS [22] پرداخته می‌شود که در این خصوص از آنالیز غیرخطی برای تحلیل استفاده می‌گردد. هدف از تحلیل در نرم‌افزار ABAQUS تعیین المان‌ها و محدوده‌ای از قاب بوده که دارای بحرانیترین شرایط تحت بارگذاری حریق می‌باشد.

به این ترتیب با شناسایی این المان‌ها و براساس اولویت‌بندی آنها در ادامه و در نرم‌افزار SAP2000 اقدام به حذف المان‌های باربر بحرانی که به طور معمول در سیستم قاب مهاربندی شده ستون‌ها و بادبندها می‌باشند می‌گردد تا به این ترتیب رفتار نمونه قاب‌ها تحت اثر خرابی پیش‌رونده ناشی از آتش‌سوزی ارزیابی شود و وضعیت بحرانی برای قاب‌ها با بادبند زانویی هم‌محور و برون‌محور مشخص گردد. این طرح شامل قاب با سیستم مهاربندی زانویی به شکل مناسب به نحوی است که دارای کمترین میزان تغییر شکل و تنش و انرژی تحت خرابی پیش‌رونده ناشی از بار حریق باشد. همچنین طراحی بادبند زانویی هم‌محور و برون‌محور با طراحی بادبندهای هم‌محور و برون‌محور متعارف معمولی نیز مقایسه می‌گردد. اثرات زمان تداوم آتش نیز از جمله پارامترهای مؤثر بر نتایج بوده که در این تحقیق بررسی می‌شود. قاب‌های فولادی ۳ و ۶ و ۹ طبقه در این تحقیق مورد توجه بوده و اثر بار آتش بر روی المان‌های آنها بررسی می‌شود. مقاطع ستون‌ها از نوع بال‌پهن و یا باکس، مقاطع تیرها از نوع IPE تک یا دوپل و یا تیورورق و مقاطع مهاربندها از نوع دوپل ناودانی بوده تا با عرف شرایط اجرایی کشور مطابقت داشته باشد. المان زانویی نیز بهتر است

آتش سوزی مشخص شود. همچنین مقادیر تنش تسلیم و تنش نهایی و مدول الاستیسیته نیز به عنوان تابعی از دما بوده که در ادامه هر یک از این موارد مشخص می گردند. در این تحقیق بار مرده طبقات $6/7 \text{ KN/m}^2$ و بار زنده طبقات $1/96 \text{ KN/m}^2$ و بار مرده بام $6/03 \text{ KN/m}^2$ و بار زنده بام $1/47 \text{ KN/m}^2$ تعریف شده است. مدول الاستیسیته 210000 Kg/cm^2 و وزن واحد حجم 7850 Kg/m^3 و تنش تسلیم 2400 Kg/cm^2 و تنش نهایی 3700 Kg/cm^2 در نظر گرفته شده است.

در ابتدا تابع دما-زمان بایستی مشخص گردد. در این خصوص از تابع دما-زمان به فرم نمودار شکل (۱) استفاده می گردد. نمودارهای تنش-کرنش فولاد ساختمانی در دماهای بالا نیز در شکل (۲) نشان داده شده است که بر این اساس لازم است تا اصلاحات لازم بر روی منحنی و مقادیر تنش کرنش فولاد ساختمانی به منظور تحلیل آتش سوزی در مقایسه با شرایط عادی انجام گیرد [23].



شکل ۱ منحنی زمان-دما استاندارد ایزو ۸۳۴ [23]

در نهایت بایستی مقادیر تنش تسلیم و تنش نهایی و مدول الاستیسیته مصالح فولادی بر اساس دما اصلاح گردد تا از این مقادیر به منظور تحلیل حرارتی استفاده شود. در این خصوص از منحنی های شکل (۳) استفاده می شود.

از مقاطع ظریف و با نمره و سختی کم و با شکل پذیری بالا (نسبت به المان بادبندی) بوده تا به عنوان فیوز ارتباطی عملکرد مناسبی را داشته و خرابی و گسیختگی در این ناحیه ایجاد گردد که در این صورت می توان به راحتی آن را تعویض و بهسازی نمود. جنس فولاد برای سازه ها از نوع ST37 می باشد و بارگذاری ثقلی براساس مبحث ششم مقررات ملی صورت می پذیرد. نوع خاک مورد مطالعه برای سازه ها، خاک نوع III می باشد و ضریب اهمیت ساختمان نیز برای ساختمان های با اهمیت متوسط $I=1$ بررسی خواهد شد. بارگذاری لرزه ای نیز براساس آیین نامه ۲۸۰۰ ویرایش جدید انجام می گیرد.

مراحل گام به گام به منظور مطالعه بر روی قاب های فولادی ۳ و ۶ و ۹ طبقه به صورت زیر قابل بیان است:

۱) در ابتدا و برای هر یک از قاب های نام برده برای دو حالت سیستم بادبند زانویی از نوع هم محور و برون محور هشتی با استفاده از نرم افزار ABAQUS، تحلیل حرارتی بر روی قاب ها انجام می گردد تا در ابتدا محل های بحرانی المان های قاب ها، برای هر حالت بادبند زانویی اعم از هم محور و برون محور تحت بار حریق مشخص گردند. در این مرحله هیچ المانی از مدل حذف نمی شود چون طبیعتاً مشخص نیست که تحت اثر آتش سوزی چه محدوده و چند المان و کدام المان های قاب تسلیم می گردند و همچنین اولویت تسلیم المان های بحرانی نیز مشخص نیست و با انجام تحلیل حرارتی این مسئله مشخص می شود. همچنین زمان شروع خرابی پیش رونده براساس نتایج به دست آمده و منحنی های انرژی-زمان مشخص می گردد.

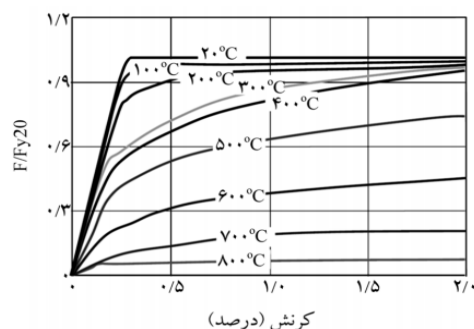
۲- در ادامه قاب های بررسی شده در نرم افزار SAP مجدداً مدل شده و بر اساس نتایج قسمت قبل المان یا المان های بحرانی بر اساس سناریوهای مختلف حذف می گردند و قاب ها بررسی می شوند تا بحرانی ترین حالت حذف المان برای آنها مشخص گردد.

۳) در مرحله سوم زمان تداوم آتش و تأثیر آن بر بحرانی ترین حالت مشخص شده قاب ها در حالت قبل بررسی می شود.

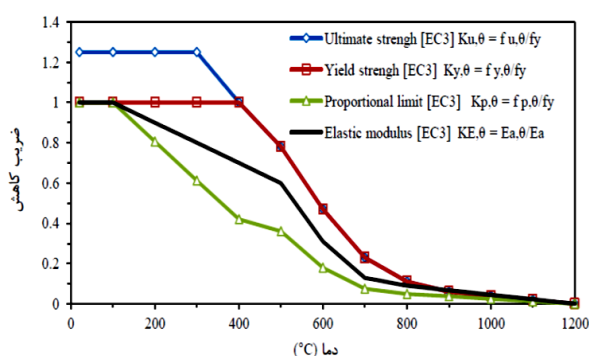
۴) در نهایت مقایسه ای بین رفتار قاب های فولادی با المان زانویی و بدون المان زانویی تحت اثر خرابی پیش رونده انجام می شود تا در شرایط مشابه تأثیر المان زانویی بررسی گردد. به منظور انجام تحلیل بایستی تابع دما-زمان

در ادامه قطعات مختلف مدل اسمبل می‌شوند. در این تحقیق مدل تنها شامل قاب بوده که در یک پارت ترسیم می‌گردد لذا در این بخش اسمبلی برای یک جز تنها یعنی قاب می‌باشد. همچنین به منظور هماهنگی بین نتایج تحلیل در نرم‌افزارها از تحلیل دینامیکی استفاده می‌شود.

در ادامه شرایط مرزی تعریف می‌گردد. این شرایط مرزی شامل شرایط مرزی تکیه‌گاهی و بارگذاری می‌باشند. پای ستون‌ها به صورت گیردار کامل در نظر گرفته می‌شوند. بارگذاری نیز شامل بارگذاری آتش در نرم‌افزار ABAQUS می‌باشد (بارهای ثقیلی شامل وزن المان‌های قاب و بارهای مرده و زنده کف‌ها و بار جانبی زلزله بوده که در نرم‌افزار SAP به منظور طراحی لرزه‌ای قاب در نظر گرفته می‌شود و نتایج طراحی حاصل و مقاطع نهایی در نرم‌افزار SAP به منظور تحلیل آتش‌سوزی در نرم‌افزار ABAQUS در نظر گرفته می‌شود). در نهایت المان‌بندی اعضای قاب انجام می‌گیرد که تعداد تقسیمات المان‌های قاب بایستی براساس میزان شکل‌پذیری قاب در نظر گرفته شود. نوع المان برای تیر و ستون از نوع BEAM برای بادبندها از نوع TRUSS می‌باشد. برای لینک‌های ارتباطی در دو انتهای بادبند نیز استفاده از المان BEAM منطقی و مناسب است و توصیه می‌شود. در نرم‌افزار SAP2000 نیز، هندسه مدل ایجاد گردیده و مقاطع و مشخصات مصالح تعریف می‌شود. نوع تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی فرض می‌شود و در این صورت بایستی تابع حریق مطابق با نمودار شکل (۴) در نرم‌افزار تعریف و ترسیم گردد. سایر مراحل تحلیل به مانند تحلیل سازه‌ها در نرم‌افزار انجام می‌شود. خروجی‌ها نیز همان طور که در قبل بیان گردید شامل توزیع، مقدار حداکثر تنش حرارتی، کرنش حرارتی، تغییر مکان ناشی از آتش‌سوزی، انرژی سازه در حین آتش‌سوزی و در نهایت نیروهای داخلی المان‌های قاب ناشی از اثرات حرارت بر سازه به ازای دماهای مختلف بوده که از نرم‌افزار به صورت عددی و نموداری قابل استخراج است. همچنین در این نرم‌افزار با حذف المان‌های باربر اصلی سازه (که ترتیب حذف آنها بر اساس تحلیل و نتایج آن در نرم‌افزار ABAQUS حاصل شده) رفتار سازه تحت اثر خرابی پیش‌رونده در اثر بار آتش‌سوزی ارزیابی خواهد شد.



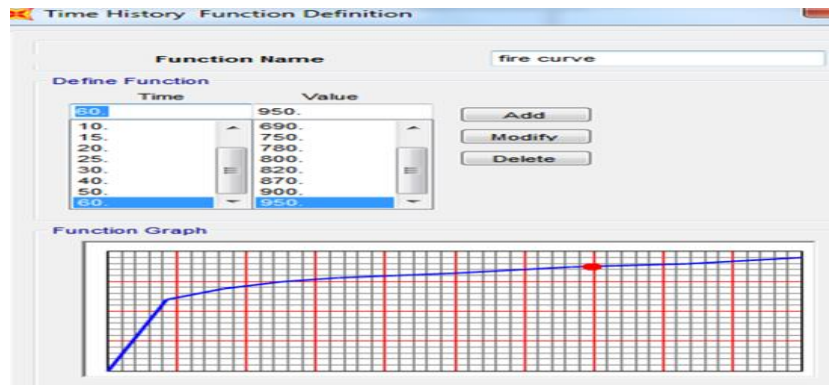
شکل ۲ نمودارهای تنش-کرنش فولاد ساختمانی در دماهای بالا [23]



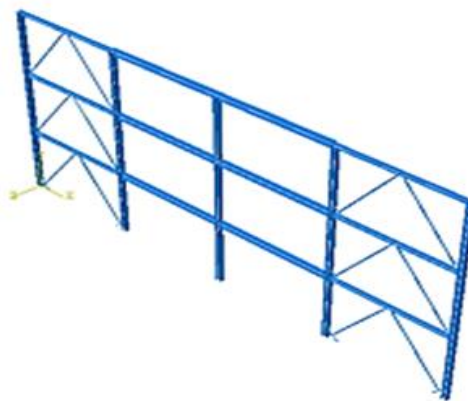
شکل ۳ ضرایب کاهش روابط تنش-کرنش در دمای بالا برای فولاد ساختمانی [23]

روند مدل‌سازی و تحلیل نمونه‌ها

ترسیم هندسه مدل: به منظور ترسیم هندسه مدل در نرم‌افزار ABAQUS نیازی به مدل‌سازی قاب بر اساس استفاده از المان‌های حجمی نبوده و تنها زمان تحلیل و مدل پیچیده می‌گردد. لذا با استفاده از المان‌های خطی قاب در نرم‌افزار مدل می‌گردد. در گام بعدی مشخصات مصالح تعریف می‌شود. این بخش از کار دارای اهمیت بسیار زیادی بوده و در حقیقت نتایج به دست آمده کاملاً به این بخش وابسته است. به منظور انجام تحلیل که می‌تواند از نوع استاتیکی غیرخطی و با در نظر گرفتن تغییر شکل‌های بزرگ و یا دینامیکی باشد مشخصات الاستیک و پلاستیک مصالح فولادی، وزن مخصوص، ضریب انبساط حرارتی، مدول الاستیسیته، تنش تسلیم و نهایی وابسته به دما و... برای فولاد بایستی در این بخش به دقت معرفی گردند که این داده‌ها براساس منحنی‌های ارائه شده در شکل (۱ و ۲ و ۳) و توضیحات مربوطه استخراج شده و در نرم‌افزار وارد می‌گردند. در بخش بعدی مشخصات مقاطع تیرها و ستون‌ها که در نرم‌افزار براساس شکل مقطع قابل تعریف است معرفی می‌شوند و این مقاطع به تیر و ستون و بادبند تخصیص می‌یابد.



شکل ۴ تعریف تابع دما- زمان در نرم افزار SAP2000



شکل ۵ نمونه قاب ۳ طبقه با بادبند هم محور زانویی

جدول ۱ مشخصات اعضای سازه‌ای ساختمان‌های مورد نظر

ناودانی	تیر دهانه های میانی	تیر دهانه اول و آخر	ستون	ساختمان
۲UNP۱۰۰	PG۲۲۰×۱۰F۱۲۰×۱۵	IPE۲۰۰	IPB۲۴۰	طبقه ۳
۲UNP۱۴۰	PG۳۰۰×۱۰F۱۵۰×۱۵	IPE۲۷۰	Box۳۵۰×۳۵۰	طبقه ۶
۲UNP۲۰۰	PG۳۰۰×۱۰F۲۰۰×۱۵	IPE۲۷۰	BOX۴۰۰×۴۰۰	طبقه ۹

سازه‌های نمونه

بادبندی زانویی از نوع هم محور و برون محور به شکل هشتی و مقایسه رفتار آنها با مهاربندهای هشتی هم محور و برون محور معمولی مشابه بدون المان زانویی می باشد.

به منظور بررسی بر روی قاب ۳ طبقه در ابتدا قاب با مهاربند زانویی هم محور هشتی و در ادامه قاب با مهاربندی برون محور بررسی می گردد. در گام اول قاب در نرم افزار SAP تحلیل و طراحی شده است (طراحی لرزه‌ای). در سازه ۳ طبقه مقاطع ستون‌ها از نوع تیر آهن نیم پهن بوده است. ارتفاع طبقات ۳ متر و طول دهانه‌ها ۵ متر در نظر گرفته شده است (شکل ۵). ابعاد مقاطع سازه‌های بررسی شده در جدول (۱) آمده است.

نوع سازه: تمامی سازه‌ها فولادی و به شکل دو بعدی طراحی و تحلیل می گردند.

-ارتفاع قاب‌های فولادی: به این منظور سه تیپ قاب به قرار ۳ و ۶ و ۹ طبقه فولادی در نظر گرفته می شوند (با ارتفاع هر طبقه برابر با ۳ متر).

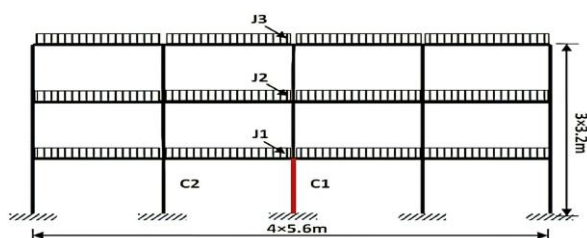
-طول دهانه‌های قاب و دهانه‌های دارای بادبندی: به طور معمول مقدار متعارف در محدوده ۴ تا ۶ متر بوده که در این تحقیق پارامتری، ثابت برابر با ۵ متر برای تمامی دهانه‌های قاب‌های مورد مطالعه فرض می گردد.

-نوع سیستم باربر جانبی: در این تحقیق هدف بررسی سیستم

حال با مشخص شدن طراحی قاب نمونه، در ادامه تحلیل قاب تحت اثر بار آتش‌سوزی بدون در نظر گرفتن اثرات خرابی پیش‌رونده در نرم‌افزار ABAQUS بررسی می‌شود. به منظور ترسیم هندسه قاب از حالت ترسیم Wire2d استفاده می‌شود. این حالت به معنی استفاده از المان خطی در فضای دو بعدی می‌باشد که برای مدل‌سازی قاب (به صورت دو بعدی) مناسب است. در ادامه مشخصات مصالح فولادی که یکی از مهمترین بخش‌ها به منظور تحلیل می‌باشد تعریف می‌شود. مشخصات الاستیسیته و پلاستیسیته فولاد در این حالت تابعی از دما و تغییرات آن در حین آتش‌سوزی است که بنا بر آنچه که بیان شد در این قسمت در نرم‌افزار وارد می‌گردد.

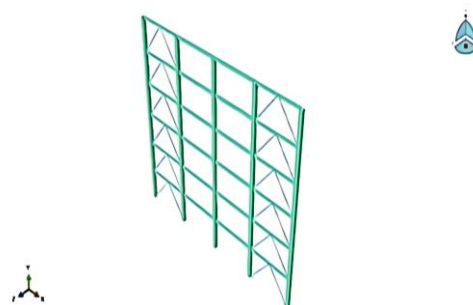
صحت‌سنجی

به منظور اعتبارسنجی مطالعه‌ای تحت عنوان تحلیل خرابی پیش‌رونده ساختمان فولادی تحت بار حریق [24] مورد توجه و مبنای کار قرار گرفت. سازه مورد نظر یک قاب فولادی ۳ طبقه ۴ دهانه بوده که تحت اثر بار حریق و گسیختگی پیش‌رونده ناشی از آن ستون میانی آن تسلیم شده (حذف می‌گردد) و رفتار قاب پس از حذف ستون ارزیابی می‌شود. در شکل (۷) هندسه و ابعاد قاب نشان داده شده است. در تحقیق انجام شده از روش‌های تحلیلی و مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS به منظور مطالعه روی چند نمونه قاب استفاده گردید. هدف از بررسی قاب مورد نظر ارزیابی نیروی محوری ستون C2 پس از حذف ستون C1 بوده که به این منظور مجدداً با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS نتایج ارزیابی گردیده و با نتایج تحقیق انجام شده مقایسه می‌گردد.



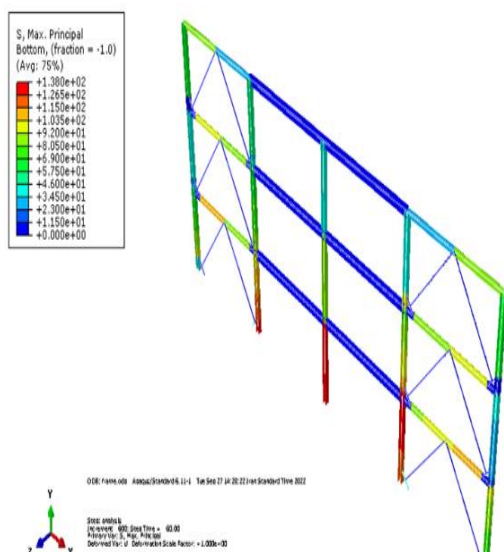
شکل ۷ هندسه و ابعاد قاب فولادی ۳ طبقه و موقعیت ستون حذف شده تحت اثر پدیده خرابی ناشی از بار حریق [24]

با توجه به اینکه ضریب رفتار قاب با سیستم بادبند زانویی در آیین نامه ۲۸۰۰ تعریف نشده لذا بایستی از روش تحلیل دینامیکی به جای روش تحلیل استاتیکی استفاده نمود. لیکن در این بررسی فرض می‌گردد که المان زانویی به طور کامل تسلیم شده و لذا می‌توان این فرض را نمود که قاب با سیستم مهاربندی از نوع بادبند هم‌محور متداول بوده و ضریب رفتار سیستم بادبندی هشتی معمولی را برای آن در نظر گرفته می‌شود. المان زانویی شکل‌پذیری قاب را افزایش داده که این موضوع ضریب رفتار بالاتری را برای قاب در پی داشته که نتیجه آن ضریب زلزله کمتر و در نتیجه کاهش نیروی برش پایه ناشی از زلزله می‌باشد. لذا طراحی قاب با سیستم بادبند زانویی که براساس سیستم بادبند معمولی مشابه طراحی می‌شود را می‌توان دست بالا دانست که در جهت اطمینان است. در طراحی سازه ۶ طبقه، مقاطع ستون‌ها به شکل باکس و مقاطع تیرها از نوع تیورق یا IPE استاندارد و مقاطع بادبندها نیز از دوپل ناودانی و در نهایت مقاطع لینک‌های ارتباطی بادبند نیز از پروفیل نبشی یا IPE ضعیف در نظر گرفته می‌شوند. نوع بادبند نیز به صورت هشتی در نظر گرفته می‌شود. قاب دارای چهار دهانه ۵ متری بوده که دهانه‌های اول و آخر دارای سیستم مهاربندی از نوع بادبند زانویی می‌باشد. ارتفاع طبقات نیز ۳ متر فرض شده و فولاد مصرفی از نوع نرمه ساختمانی معادل با ST37 در نظر گرفته می‌شود. در ابتدا قاب بر اساس روش استاتیکی تحلیل و در ادامه طراحی شده و در ادامه، تحلیل حرارتی بر روی آن انجام می‌گردد و در نهایت امر رفتار آن تحت خرابی پیش‌رونده ناشی از بار آتش‌سوزی بررسی می‌گردد (شکل ۶).

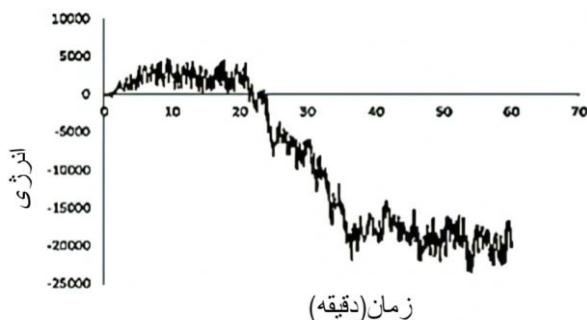


شکل ۶ شکل قاب ۶ طبقه با مقاطع آن در نرم‌افزار ABAQUS

در بازه زمانی نام برده اتفاق افتاده است. لذا تا ۲۰ دقیقه از زمان شروع حریق هنوز تسلیم المان‌ها آغاز نشده و پس از دقیقه ۳۵ نیز المان‌ها تسلیم شده و وارد فاز انهدام شده‌اند و تسلیم اعضا از دقیقه ۳۵ به بعد نمی‌تواند منجر به انهدام اعضا گردد چرا که باز توزیع نیروها و تنش‌های ناشی از بار حریق انجام شده و نیروها از المان‌های آسیب دیده به سایر اعضای سازه انتقال یافته‌اند.



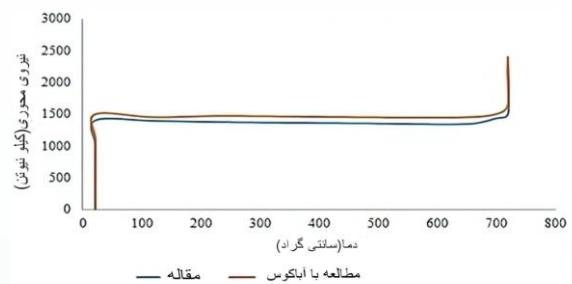
شکل ۹ توزیع تنش حرارتی در قاب ۳ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور ناشی از بار حریق



شکل ۱۰ منحنی انرژی-زمان قاب ۳ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور ناشی از بار حریق

در ادامه منحنی‌های انرژی‌های زمان برای سه حالت حذف المان‌ها به قرار: (۱) حذف ستون میانی قاب، (۲) حذف ستون میانی و ستون سمت راست و (۳) حذف ستون‌های میانی و طرفین آن بررسی و مقایسه می‌گردد.

براساس نتایج حاصل از مدل‌سازی و تحلیل انجام شده مشخص گردید که اختلاف خطای نسبی حداکثر ۱۰ درصدی بین نتایج به دست آمده برای نیروی محوری ستون C2 حاصل از مطالعه انجام شده در قبل (نتایج مقاله) و مطالعه حاضر وجود دارد. لذا دقت نتایج مناسب بوده و به منظور کاهش مقدار خطای نسبی می‌توان تعداد تقسیمات المان‌های قاب (مش‌بندی) را افزایش داد. لازم به ذکر است که با افزایش تعداد تقسیمات المان‌های قاب (تیر و ستون) دقت تحلیل و زمان آن افزایش می‌یابد (شکل ۸).



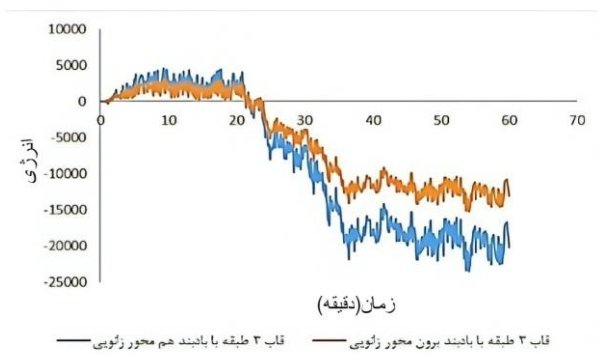
شکل ۸ مقایسه تغییرات نیروی محوری ستون C2 در دماهای مختلف براساس نتایج تحقیق انجام شده (مقاله) و تحقیق حاضر (به ترتیب منحنی‌های آبی و قرمز رنگ)

نتایج تحلیل‌ها

در ابتدا قاب ۳ طبقه در نرم‌افزار ABAQUS مدل گردیده و تحت بار حریق تحلیل می‌شود. همان‌طور که در شکل (۹) مشخص است ستون میانی و دو ستون اطراف آن و همچنین تیرهای طبقات اول و دوم در کناره‌های قاب دارای تنش‌های حرارتی بیشتری بوده است. بر این اساس در ادامه تمرکز بر روی ستون‌های نام برده بوده و یک‌به‌یک حذف شده و رفتار قاب ارزیابی می‌گردد. در این خصوص ابتدا ستون میانی و در ادامه ستون‌های طرفین آن حذف می‌شود و با استفاده از نرم‌افزار SAP اقدام به ارزیابی قاب می‌گردد.

در شکل (۱۰) نیز منحنی انرژی-زمان قاب در طول زمان حریق نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است در بازه زمانی ۲۰ تا ۳۵ دقیقه منحنی انرژی دارای شیب بسیار شدید و ناگهانی را داشته و این موضوع نشان می‌دهد که زمان شروع تسلیم اولین المان از دقیقه ۲۰ بوده و تسلیم شدن المان‌ها

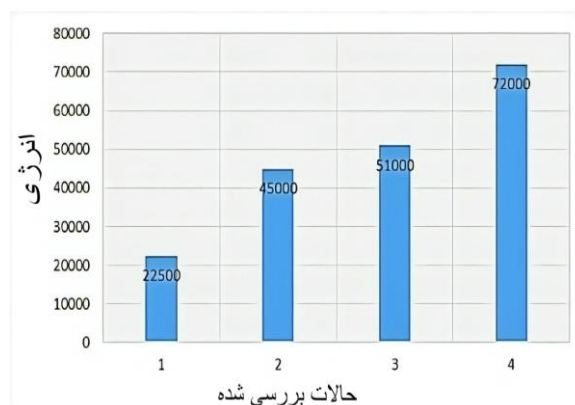
شکل‌پذیری بالای بادبند برون‌محور بوده که در خلال وقوع حریق بر اثر قابلیت پذیرش تغییرشکل‌ها بازتوزیع نیروها و جذب و استهلاک انرژی را مرتباً در پی داشته که نتیجه آن کاهش قابل ملاحظه انرژی است (شکل ۱۲).



شکل ۱۲ مقایسه منحنی‌های انرژی-زمان قاب ۳ طبقه با بادبند هم‌محور زانویی و برون‌محور ناشی از بار حریق

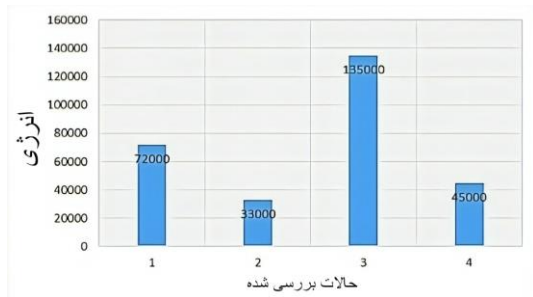
براساس نتایج به دست آمده از تحلیل مشخص شد که برای قاب با بادبند زانویی برون‌محور، فقط ستون میانی دارای شرایط بحرانی بوده‌است. در توجیه نتیجه حاصل شده می‌توان چنین بیان نمود که قاب فولادی با مهاربند برون‌محور دارای شکل‌پذیری بالایی می‌باشد. این مسئله در ترکیب با المان زانویی منجر به افزایش قابل توجه شکل‌پذیری قاب می‌گردد. قاب ۳ طبقه فولادی به عنوان قاب صلب بوده که در صورت استفاده از بادبند هم‌محور، باعث صلبیت و سختی بسیار بیشتری می‌گردد. لیکن در صورت استفاده از بادبند برون‌محور که همراه با المان زانویی است، شکل‌پذیری بسیار قابل توجهی را داشته و رفتار لرزه‌ای و رفتار آن در مقابل سایر بارها از جمله بار حریق را بهبود می‌بخشد. لذا در ادامه تنها سناریوی حذف ستون میانی برای قاب مورد نظر بررسی می‌گردد. براساس نتایج به دست آمده (شکل ۱۳) مقدار انرژی برای حالتی که ستون میانی حذف گردیده برای قاب ۳ طبقه با بادبند برون‌محور زانویی، در حدود ۱۰ درصد انرژی افزایش یافته‌است. هر چند انرژی قاب با بادبند برون‌محور زانویی بیش از انرژی برای قاب با بادبند هم‌محور زانویی بوده (در حدود ۳۳ درصد بیشتر) اما حذف ستون در قاب با بادبند برون‌محور زانویی تنها باعث افزایش انرژی به میزان ۱۰ درصد شده‌است.

همان‌طور که در شکل (۱۱) مشخص است در حالت حذف تک ستون میانی مقدار انرژی تا ۲ برابر و برای حالت حذف دو ستون انرژی تا ۲/۳ برابر و برای حالت حذف سه ستون انرژی تا ۳/۲ برابر در مقایسه با حالتی که المانی حذف نشده افزایش یافته‌است. لذا نرخ افزایش برای حالت حذف تک ستون میانی نسبت به سایر حالات (به صورت نسبی) بیشتر بوده‌است و این به معنای آن است که حذف ستون میانی قاب بر اثر حریق بیشترین تأثیر را بر افزایش خسارات وارده بر سازه را دارد. لذا توجه ویژه بر مقاوم‌سازی المان‌های باربر اصلی و به خصوص ستون‌های میانی سازه که بخش بیشتری از بارهای وارده بر سازه را حمل می‌کنند، شود.

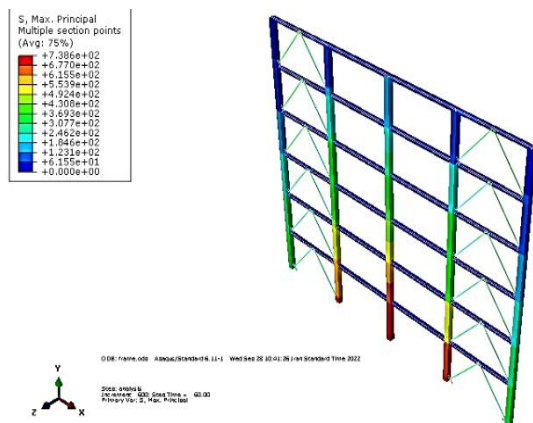


شکل ۱۱ مقایسه انرژی قاب ۳ طبقه با مهاربند هم‌محور زانویی به ترتیب برای حالات: (۱) بدون حذف المان، (۲) حذف ستون میانی، (۳) حذف ستون میانی و ستون سمت راست و (۴) حذف ستون میانی و ستون‌های طرفین

با توجه به نتایج برای قاب ۳ طبقه با سیستم بادبند هم‌محور زانویی بحرانیترین حالت را می‌توان حذف ستون میانی سازه تحت اثر حریق دانست. سپس به بررسی قاب ۳ طبقه فولادی با سیستم بادبند برون‌محور زانویی پرداخته می‌شود و در ابتدا طراحی قاب برای سیستم بادبند برون‌محور کنترل شده تا در ادامه به آنالیز حرارتی آن پرداخته شود. لازم به ذکر است که طول تیر پیوند بر اساس طراحی معمول و بهینه آن (بر اساس رفتار برشی تیر پیوند) برابر با ۱ متر (۰/۲ طول دهانه تیر) در نظر گرفته شده‌است. براساس نتایج از تحلیل قاب‌های ۳ طبقه هم‌محور و برون‌محور زانویی مشخص گردید که در مجموع قاب با بادبند برون‌محور زانویی انرژی در حدود ۳۵ درصد کمتر از قاب بادبند هم‌محور زانویی را در خلال وقوع حریق و در بازه زمانی کل آن داشته‌است. این موضوع به دلیل



شکل ۱۴ مقایسه انرژی قاب ۳ طبقه با مهاربندهای مختلف در برابر خرابی پیش‌رونده به ترتیب برای حالات: (۱) قاب با بادبند هم‌محور زانویی، (۲) قاب با بادبند برون‌محور زانویی، (۳) قاب با بادبند هم‌محور معمولی و (۴) قاب با بادبند برون‌محور معمولی

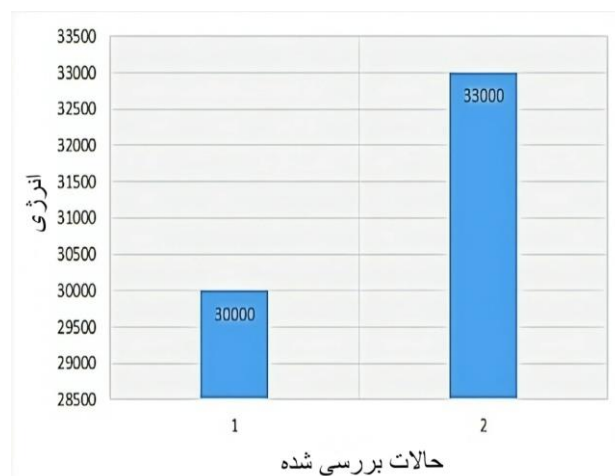


شکل ۱۵ توزیع تنش ناشی از بار حریق در قاب ۶ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور در نرم‌افزار ABAQUS

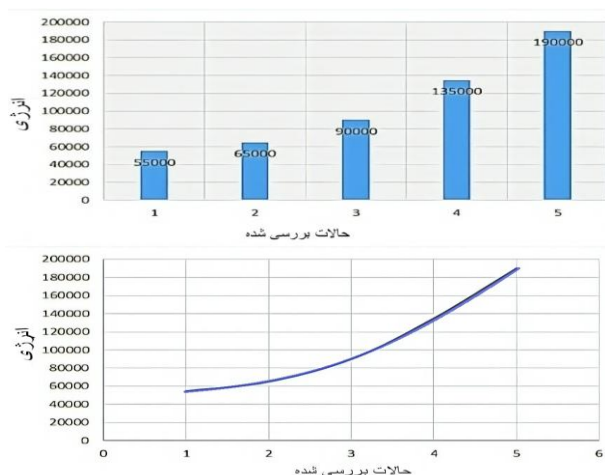
نکته دوم در خصوص زمان شروع تسلیم شدن المان‌ها بر اثر خرابی پیش‌رونده ناشی از حریق است. برای قاب ۶ طبقه برخلاف قاب ۳ طبقه شرایط خرابی به صورت پیوسته طی دو مرحله رخ داده است. با توجه به شکل (۱۶) در ابتدا و تا دقیقه ۲۰ حریق در سازه گسترش یافته و شرایط تسلیم شدن المان از دقیقه ۲۰ تا حدود دقیقه ۳۵ اتفاق افتاده است و از دقیقه ۳۵ تا حدود دقیقه ۴۵ سازه شرایط تقریباً ثابتی را تجربه کرده و مجدداً از دقیقه ۴۵ تا ۵۰ شیب منحنی صعودی شده و المان‌های بعدی تسلیم شده‌اند. براساس نتایج تحلیل مرحله‌ای مشاهده گردید که روال تسلیم المان‌ها به مانند قاب ۳ طبقه بود که در ابتدا ستون میانی و بعد به ترتیب ستون‌های سمت راست و چپ در طبقه اول تسلیم شدند و در ادامه ستون میانی در طبقه دوم تسلیم گردید. بالطبع با افزایش زمان حریق پیش‌بینی

این در حالی است که حذف ستون در قاب با بادبند هم‌محور زانویی باعث افزایش ۳/۲ برابری انرژی شده است و از این منظر قاب با بادبند زانویی برون‌محور مطلوبتر است. مضاف بر اینکه برای قاب با بادبند برون‌محور تنها یک ستون شرایط بحرانی را داشته و این در حالی است که برای قاب با بادبند هم‌محور زانویی تعداد ۳ ستون وضعیت بحرانی دارد که در مجموع این مسئله مطلوب بودن رفتار بادبند برون‌محور زانویی در برابر خرابی پیش‌رونده ناشی از حریق را نشان می‌دهد (شکل ۱۴). نتایج دو مسئله این را نشان می‌دهد اولاً آنکه استفاده از بادبند برون‌محور به سبب شکل‌پذیری بالای آن و تأثیر بسیار قابل توجه آن بر قاب‌های کوتاه، علاوه بر رفتار لرزه‌ای مناسب، سبب رفتار و عملکرد بسیار عالی در برابر خرابی پیش‌رونده شده است. ثانیاً استفاده از المان زانویی تأثیر بسیاری بر رفتار و عملکرد سازه‌های کوتاه با سیستم مهاربندی زانویی در برابر خرابی پیش‌رونده ناشی از بار حریق دارد.

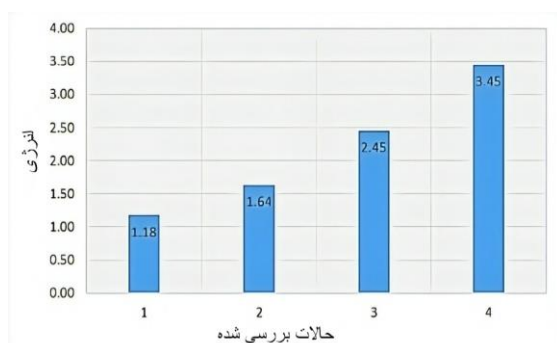
برای قاب ۶ طبقه با بادبند هم‌محور زانویی براساس تحلیل حرارتی مشخص شد که ستون میانی و ستون‌های دو طرف آن در طبقه اول و ستون میانی در طبقه دوم شرایط بحرانی را دارند. لذا سناریوی حذف ستون شامل حذف ستون میانی در طبقه اول و سپس حذف ستون میانی در طبقه دوم و در گام سوم و چهارم حذف ستون‌های طرفین ستون میانی طبقه اول به ترتیب و اولویت بحرانی بودن آنها می‌باشد (شکل ۱۵).



شکل ۱۳ مقایسه انرژی قاب ۳ طبقه با مهاربند برون‌محور زانویی به ترتیب برای حالات: (۱) بدون حذف المان و (۲) حذف ستون میانی



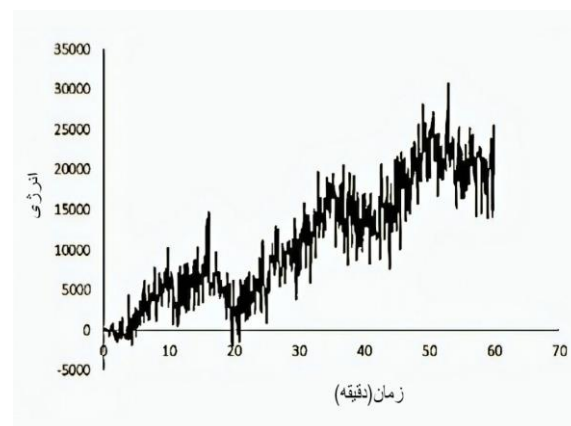
شکل ۱۷ مقایسه انرژی قاب ۶ طبقه با مهاربند هم‌محور زانویی به ترتیب برای: (۱) بدون حذف المان، (۲) حذف ستون میانی در طبقه اول، (۳) حذف ستون میانی و ستون سمت راست آن در طبقه اول، (۴) حذف ستون میانی و ستون‌های طرفین آن در طبقه اول و (۵) حذف ستون میانی در طبقه اول و ستون‌های طرفین آن و ستون میانی طبقه دوم



شکل ۱۸ مقایسه نسبت انرژی قاب ۶ طبقه با مهاربند هم‌محور زانویی به ترتیب برای حالات ۲ تا ۵ نسبت به حالت ۱ (بدون حذف المان)

براساس نتایج تحلیل قاب‌های ۶ طبقه هم‌محور و برون‌محور زانویی مشخص شد که در قاب با بادبند برون‌محور زانویی انرژی در حدود ۵۰ درصد کمتر از قاب با بادبند هم‌محور زانویی را در خلال وقوع حریق و در کل بازه زمانی داشته است. در این حالت علاوه بر شکل‌پذیری و قابلیت جذب و استهلاک انرژی بالای المان زانویی، خود قاب و همچنین مهاربندهای برون‌محور دارای شکل‌پذیری بالایی بوده است. قاب جزو قاب‌های با ارتفاع متوسط و نسبتاً بلند بوده و دارای شکل‌پذیری نسبتاً مناسب و بالایی می‌باشد (شکل ۱۹).

می‌گردد تا حدود ۹۰ تا ۱۲۰ دقیقه پس از شروع حریق ستون‌های هم‌جوار ستون میانی در طبقه دوم و در ادامه ستون میانی در طبقه سوم و ستون‌های هم‌جوار آن و... نیز تسلیم گردند. لذا وضعیت خرابی پیش‌رونده در قاب به طور کلی مشخص گردید که در حالت کلی در ابتدا ستون میانی در هر طبقه و بعد ستون‌های دو طرف آن و به همین منوال برای طبقات بالا پی‌درپی تسلیم می‌گردند.

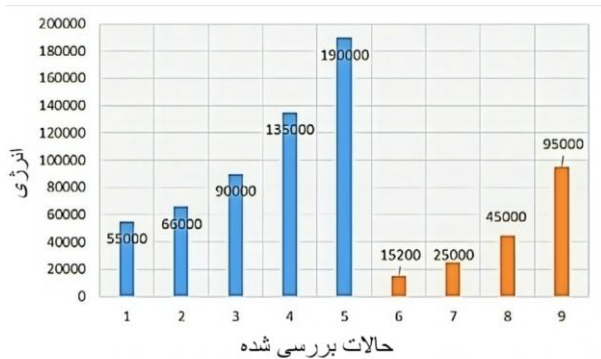


شکل ۱۶ منحنی انرژی زمان قاب ۶ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور ناشی از بار حریق

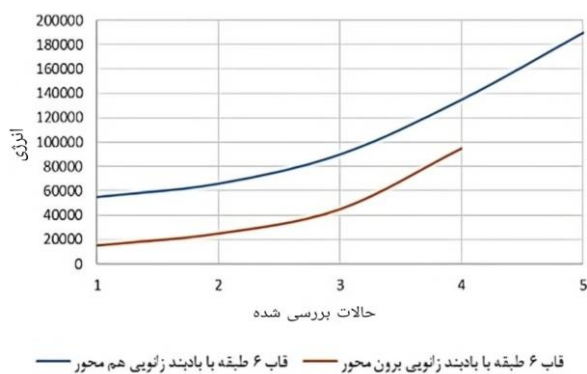
حال و در ادامه براساس سناریوهای مطرح شده که در زیر آورده شده المان‌ها حذف و رفتار قاب بررسی می‌گردد: (۱) حذف ستون میانی در طبقه اول، (۲) حذف ستون سمت راست و ستون میانی در طبقه اول، (۳) حذف ستون‌های طرفین و ستون میانی در طبقه اول و (۴) حذف ستون میانی در طبقه دوم (شکل ۱۷ و ۱۸)

برای قاب ۶ طبقه با مهاربند هم‌محور زانویی مشاهده گردید که نسبت افزایش انرژی برای هر حالت حذف المان پی‌درپی با افزایش تعداد المان‌های حذف شده نه تنها به صورت صعودی و قابل توجهی افزایش یافته بلکه ارتباط بین تعداد المان‌های حذف شده و انرژی به صورت غیرخطی است (شکل ۱۷) که این نکته بسیار جالب توجه است. این موضوع بسیار مهم است که حذف هر المان تحت اثر بار آتش‌سوزی منجر به افزایش قابل توجه انرژی می‌گردد که در بخش‌های قبل بررسی گردید لیکن موضوع بسیار پر اهمیت‌تر از موقعیت المان حذف شده است.

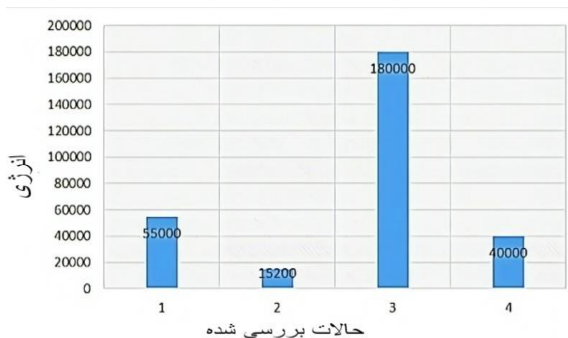
سازه را به میزان قابل توجهی افزایش داده و این موضوع منجر به رفتار بسیار مطلوب قاب تحت اثر خرابی پیش‌رونده ناشی از بار آتش‌سوزی می‌گردد (شکل ۲۱-۲۳).



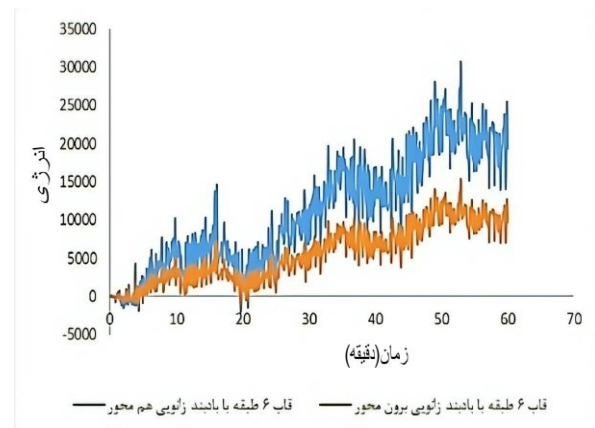
شکل ۲۱ مقایسه انرژی قاب ۶ طبقه با مهاربند هم‌محور و برون‌محور زانویی برای سناریوهای مختلف بدون و با حذف المان (۵ حالت برای بادبند هم‌محور و ۴ حالت برای بادبند برون‌محور)



شکل ۲۲ مقایسه تغییرات انرژی قاب ۶ طبقه با مهاربند هم‌محور و برون‌محور زانویی برای سناریوهای مختلف حذف المان (۵ حالت برای بادبند هم‌محور و ۴ حالت برای بادبند برون‌محور زانویی)



شکل ۲۳ مقایسه انرژی قاب ۶ طبقه با مهاربندهای مختلف در برابر خرابی پیش‌رونده به ترتیب برای حالات: (۱) قاب با بادبند هم‌محور زانویی، (۲) قاب با بادبند برون‌محور زانویی، (۳) قاب با بادبند هم‌محور معمولی و (۴) قاب با بادبند برون‌محور معمولی



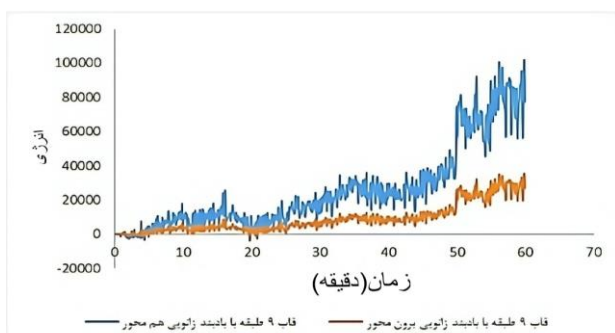
شکل ۱۹ مقایسه منحنی‌های انرژی-زمان قاب ۶ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور و برون‌محور ناشی از بار حریق

براساس نتایج به دست آمده از تحلیل قاب ۶ طبقه برون‌محور به ترتیب تنش‌های ایجاد شده در ستون میانی در طبقه اول و ستون سمت راست آن و در ادامه ستون میانی در طبقه دوم باعث بحرانیتر شدن آنها گردیدند. لذا ۳ سناریوی حذف ستون در این حالت مورد توجه است که در ادامه نتایج حاصل از حذف آنها بررسی می‌گردد (شکل ۲۰).



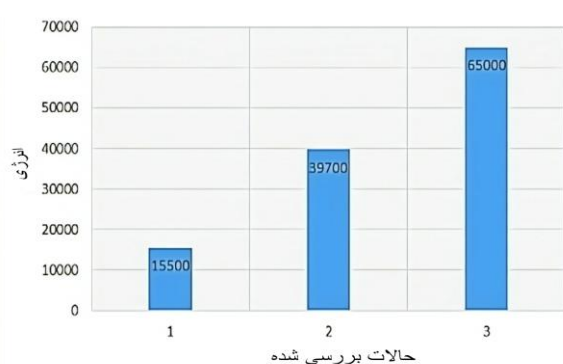
شکل ۲۰ مقایسه انرژی قاب ۶ طبقه با مهاربند برون‌محور زانویی به ترتیب برای حالات: (۱) بدون حذف المان، (۲) حذف ستون میانی در طبقه اول، (۳) حذف ستون میانی و ستون سمت راست آن در طبقه اول و (۴) حذف ستون میانی در طبقه دوم

همچنین براساس مقایسه نتایج انرژی مشخص شد که استفاده از بادبند برون‌محور زانویی برای قاب ۶ طبقه نیز کارایی و شرایط مطلوبتری را در مقایسه با بادبند هم‌محور زانویی دارد که در این حالت علاوه بر شکل‌پذیری بادبند برون‌محور و المان زانویی، شکل‌پذیری بالای قاب نیز در مشارکت با شکل‌پذیری بادبندی و المان زانویی در مجموع شکل‌پذیری

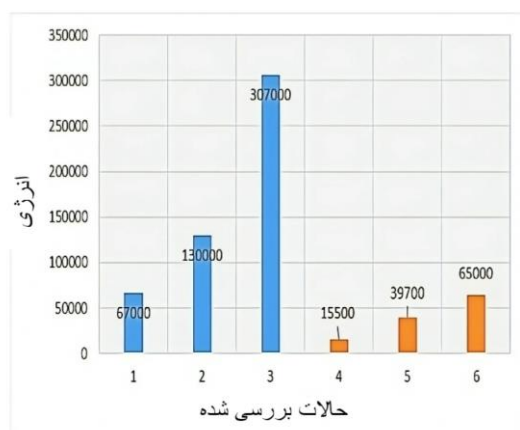


شکل ۲۵ مقایسه منحنی‌های انرژی-زمان قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور و برون‌محور ناشی از بار حریق

براساس نتایج به دست آمده مشخص گردید که حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم بحرانیترین شرایط را در پی دارد. لذا در ادامه براساس دو سناریوی حذف ستون در طبقه اول و در ادامه در طبقه دوم بررسی می‌گردد (شکل ۲۶).



شکل ۲۶ مقایسه انرژی قاب ۹ طبقه با مهاربند برون‌محور زانویی به ترتیب برای حالات: (۱) بدون حذف المان، (۲) حذف ستون میانی در طبقه اول و (۳) حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم

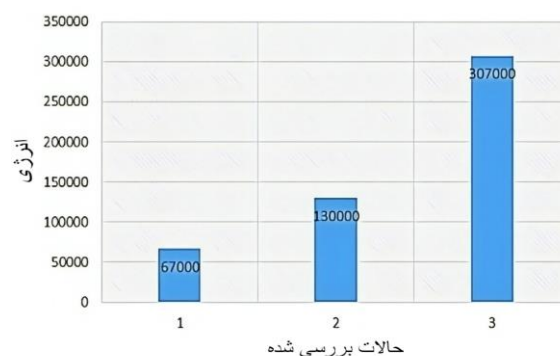


شکل ۲۷ مقایسه انرژی قاب ۹ طبقه با مهاربند هم‌محور و برون‌محور زانویی برای سناریوهای مختلف بدون و با حذف المان (۳ حالت برای بادبند هم‌محور و ۳ حالت برای بادبند برون‌محور)

براساس مطالعات مشخص شد که در قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور، حذف ستون میانی در طبقه اول قاب منجر به افزایش ۱/۴۹ برابری انرژی قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور و حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم باعث افزایش ۴/۶ برابری انرژی نسبت به حالتی که هیچ المانی حذف نمی‌گردد، شده است که نتیجه قابل توجه است (شکل ۲۴).

براساس تحلیل انجام شده بر روی قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی برون‌محور مشخص گردید که نوع بادبند تأثیر بسیار قابل توجه را بر کاهش انرژی قاب در مقایسه با سیستم بادبندی هم‌محور داشته است. شکل (۲۵) براین اساس مقدار انرژی در حالت نام‌برده تا ۶۵ درصد کاهش یافته که بسیار مطلوب است. لازم به ذکر است که قاب ۹ طبقه خود شکل‌پذیری بالایی را داشته که در ترکیب با بادبند برون‌محور و دارای المان زانویی یک سیستم سازه‌ای با شکل‌پذیری و قابلیت جذب و استهلاک انرژی بسیار مناسب را در پی دارد.

نتایج به دست آمده نشان داد که در حالت استفاده از بادبند زانویی برون‌محور به ترتیب میزان انرژی برای (۱) بدون حذف المان، (۲) حذف ستون میانی در طبقه اول و (۳) حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم در مقایسه با استفاده از بادبند زانویی هم‌محور ۷۷ و ۷۰ و ۷۹ درصد کاهش داشته که بسیار قابل توجه است. در حقیقت ترکیبی از شکل‌پذیری بالای بادبند برون‌محور و المان زانویی بادبند منجر به جذب و کاهش انرژی تا حد بسیار قابل توجهی گردیده است. قابلیت شکل‌پذیری و پذیرش تغییرشکل‌های زیاد و رفتار غیرخطی هر دو المان یعنی بادبند برون‌محور و المان زانویی متصل به آن باعث این نتیجه مطلوب گردیده است (شکل ۲۷ و ۲۸).



شکل ۲۸ مقایسه انرژی قاب ۹ طبقه با مهاربند هم‌محور زانویی به ترتیب برای حالات: (۱) بدون حذف المان، (۲) حذف ستون میانی در طبقه اول و (۳) حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم

است و از این جهت بالطبع قاب با بادبند زانویی برون محور بسیار مطلوب است.

۳. با توجه به نتایج به دست آمده برای قاب ۳ طبقه با سیستم بادبند هم محور زانویی بحرانیترین حالت را می توان حذف ستون میانی سازه تحت اثر حریق دانست.

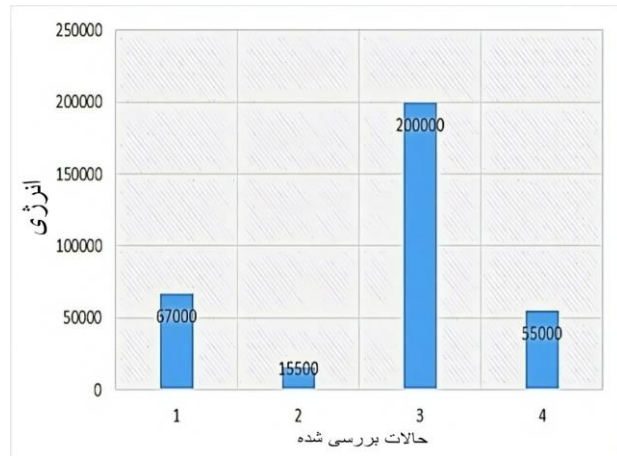
۴. برای قاب با بادبند برون محور تنها یک ستون شرایط بحرانی را داشته و این در حالی است که برای قاب با بادبند هم محور زانویی تعداد ۳ ستون وضعیت بحرانی را داشته است. در مجموع این مسئله مطلوب بودن رفتار بادبند برون محور زانویی را در برابر خرابی پیش رونده ناشی از حریق نشان می دهد.

۵. بر اساس نتایج به دست آمده از مقایسه بادبندهای هم محور و برون محور زانویی و معمولی مشخص گردید که استفاده از بادبند هم محور معمولی مقدار انرژی در حدود ۸۸ درصد بیش از بادبند هم محور زانویی را در بر داشته و برای قاب با بادبند برون محور معمولی این مقدار در حدود ۳۶ درصد بیش از مقدار انرژی برای قاب با بادبند برون محور زانویی بوده است.

نتایج به دست آمده برای قاب ۶ طبقه به قرار موارد زیر است:

۱. برای قاب ۶ طبقه با بادبند هم محور زانویی براساس تحلیل حرارتی انجام شده به وضوح مشخص گردید که ستون میانی و ستون های دو طرف آن در طبقه اول و ستون میانی در طبقه دوم شرایط بحرانی را دارند.

۲. بر اساس نتایج به دست آمده به ترتیب میزان انرژی برای حالات حذف ستون میانی در طبقه اول، حذف ستون میانی و ستون سمت راست طبقه اول، حذف ستون های نام برده در طبقه اول و ستون میانی در طبقه دوم به میزان ۱/۶۵ و ۱/۸ و ۲ برابر افزایش یافته است. همچنین براساس مقایسه نتایج انرژی مجدداً مشخص شد که استفاده از بادبند برون محور زانویی برای قاب ۶ طبقه نیز کارایی و شرایط بسیار مطلوبتری را در مقایسه با بادبند هم محور زانویی دارد. در این حالت علاوه بر شکل پذیری بادبند برون محور و المان زانویی، شکل پذیری بالای قاب نیز در مشارکت با شکل پذیری بادبند و المان زانویی در مجموع شکل پذیری سازه را به میزان قابل توجهی افزایش می دهد که این



شکل ۲۸ مقایسه انرژی قاب ۹ طبقه با مهاربندهای مختلف در برابر خرابی پیش رونده به ترتیب برای حالات: (۱) قاب با بادبند هم محور زانویی، (۲) قاب با بادبند برون محور زانویی، (۳) قاب با بادبند هم محور معمولی و (۴) قاب با بادبند برون محور معمولی

نتایج

نتایج به دست آمده برای قاب ۳ طبقه به قرار موارد زیر است:

۱. برای قاب ۳ طبقه با بادبند زانویی هم محور مشخص گردید که ستون میانی و دو ستون اطراف آن در طبقه اول و همچنین تیرهای طبقات اول و دوم در کناره های قاب دارای تنش های حرارتی بیشتری بوده اند. با توجه به اینکه عناصر لرزه بر اصلی قاب، شامل ستون ها و بادبندها می باشند؛ لذا خرابی پیش رونده برای ستون ها در موقعیت های نام برده دارای اهمیت بوده و خرابی پیش رونده با حذف این المان ها تحت بار حریق بایستی بررسی شود. همچنین مقاوم سازی این ستون ها به منظور کنترل و جلوگیری از پیشروی آسیب دیدگی در سایر اعضا مهم بوده و توصیه می گردد.

۲. براساس نتایج به دست آمده برای قاب با بادبند زانویی برون محور مشخص گردید که مقدار انرژی برای حالتی که ستون میانی حذف گردیده در حدود ۱۰ درصد افزایش یافته است. هر چند انرژی قاب با بادبند برون محور زانویی بیش از انرژی برای قاب با بادبند هم محور زانویی بوده است اما حذف ستون در قاب با بادبند برون محور زانویی تنها باعث افزایش انرژی به میزان ۱۰ درصد شده است و این در حالی است که حذف ستون در قاب با بادبند هم محور زانویی باعث افزایش ۳/۲ برابری انرژی شده

۹ طبقه با بادبند زانویی برون‌محور شده است. همچنین حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم منجر به افزایش $4/2$ برابری انرژی نسبت به حالتی که هیچ المانی حذف نمی‌گردد، شده است که نتیجه اخیر قابل توجه است.

۴. براساس مطالعه انجام شده بر روی قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی برون‌محور مشخص گردید که نوع بادبند تأثیر بسیار قابل توجه را بر کاهش انرژی قاب در مقایسه با سیستم بادبند هم‌محور داشته است. بر این اساس مقدار انرژی در حالت نام‌برده تا ۶۵ درصد کاهش یافته که بسیار مطلوب است. لازم به ذکر است که قاب ۹ طبقه خود شکل‌پذیری بالایی را داشته که در ترکیب با بادبند برون‌محور و دارای المان زانویی، یک سیستم سازه‌ای با شکل‌پذیری و قابلیت جذب و استهلاک انرژی بسیار مناسب را در پی دارد. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص گردید که حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم بحرانی‌ترین شرایط را در پی دارد.

۵. در مجموع در حالت استفاده از بادبند زانویی برون‌محور به ترتیب انرژی برای (۱) بدون حذف المان، (۲) حذف ستون میانی در طبقه اول و (۳) حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم در مقایسه با استفاده از بادبند زانویی هم‌محور ۷۷ و ۷۰ و ۷۹ درصد کاهش داشته که بسیار قابل توجه است. در حقیقت ترکیبی از شکل‌پذیری بالای بادبند برون‌محور و المان زانویی بادبند منجر به جذب و کاهش انرژی تا حد بسیار قابل توجهی گردیده است. در حقیقت قابلیت شکل‌پذیری و پذیرش تغییر شکل‌های زیاد و رفتار غیرخطی هر دو المان یعنی بادبند برون‌محور و المان زانویی متصل به آن سبب این نتیجه مطلوب شده است. استفاده از بادبند هم‌محور معمولی مقدار انرژی در حدود ۷۰ درصد بیش از بادبند هم‌محور زانویی را داشته و برای قاب با بادبند برون‌محور معمولی، این مقدار در حدود ۶۲ درصد بیش از مقدار انرژی برای قاب با بادبند برون‌محور زانویی بوده است.

سپاسگزاری

موضوع منجر به رفتار بسیار مطلوب قاب تحت اثر خرابی پیش‌رونده ناشی از بار آتش‌سوزی خواهد شد.

۳. براساس نتایج به دست آمده از شکل (۲۳) مقایسه بادبندهای هم‌محور و برون‌محور زانویی و معمولی در ساختمان ۶ طبقه مشخص شد که استفاده از بادبند هم‌محور معمولی مقدار انرژی در حدود ۷۰ درصد بیش از بادبند هم‌محور زانویی را داشته و برای قاب با بادبند برون‌محور معمولی، این مقدار در حدود ۶۲ درصد بیش از مقدار انرژی برای قاب با بادبند برون‌محور زانویی بوده است.

نتایج به دست آمده برای قاب ۹ طبقه به قرار موارد زیر است:

۱. منحنی انرژی برای قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور روند یکنواختی را برای بازه زمانی از شروع حریق تا حدود ۳۰ دقیقه اول نشان می‌دهد. این به معنای آن نیست که سازه در این بازه زمانی شرایط مطلوبی را داشته و اعضا و المان‌های سازه در معرض تسلیم و انهدام نیستند؛ بلکه سازه به سبب شکل‌پذیری بالا، سعی بر حفظ شرایط اولیه و تعادل و بازتوزیع نیروها دارد. اما از دقیقه ۳۰ به بعد با یک خیز نسبتاً ملایم و در ادامه مجدداً شرایط بازتوزیع و حفظ تعادل در نهایت تا دقیقه ۴۵ سازه با شکل‌پذیری بالایی که دارد شرایط را حفظ می‌کند. اما از دقیقه ۴۵ به بعد تسلیم اعضا و المان‌ها و به صورت پی‌درپی منجر به افزایش انرژی می‌گردد و در بازه زمانی اخیر افزایش انرژی با نرخ صعودی بسیار بالایی می‌باشد.
۲. بر اساس مطالعه انجام شده بر روی قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور مشخص شد که حذف ستون میانی در طبقه اول قاب منجر به افزایش $1/94$ برابری انرژی قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی هم‌محور و حذف ستون میانی در طبقات اول و دوم منجر به افزایش $4/6$ برابری انرژی نسبت به حالتی که هیچ المانی حذف نمی‌گردد، شده است که نتیجه اخیر بسیار قابل توجه است.
۳. براساس مطالعه انجام شده بر روی قاب ۹ طبقه با بادبند زانویی برون‌محور مشخص گردید که حذف ستون میانی در طبقه اول قاب منجر به افزایش $2/6$ برابری انرژی قاب

مراجع

1. ASCE/SEI 7-10, "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures", American Society of Civil Engineers, ASCE, Structural Engineering Institute, SEI, October, 2013.
2. J. Jiang, G.Q. Li, A. Usmani, "Progressive Collapse Mechanisms of Steel Frames Exposed to Fire," *Advances in Structural Engineering*, vol. 17, issue. 3, pp. 381-398, 2014.
3. British Standard Institute, "Loading for building, Part 6: Code of practice for dead and imposed loads", London, United Kingdom, 6991, 2011.
4. J.P.C. Rodrigues, I.C. Neves, J.C. Valente, "Experimental Research on the Critical Temperature of Compressed Steel Elements with Restrained Thermal Elongation," *Fire Safety Journal*, vol. 35, Issue. 2, pp. 77-98, 2000.
5. H.M. Ali, P.E. Senseny, R.L. Alpert, "Lateral Displacement and Collapse of Single-Story Steel Frames in Uncontrolled Fire," *Engineering Structures*, vol. 26, Issue. 5, pp. 593-607, 2004.
6. S. Orton, J.O. Jirsa, O. Bayrak, "Carbon Fiber Reinforced Polymer for Continuity in Existing Reinforced Concrete Buildings Vulnerable to Collapse," *ACI Structural Journal*, vol. 107, issue. 4, 2009.
7. C. Crosti, "Structural Analysis of Steel Structures under Fire Loading," *Acta Polytechnica*, vol. 49, no. 1, 2009.
8. A.M. Correia, T.A.C. Pires, J.P.C. Rodrigues, "Behaviour of Steel Columns Subjected to Fire," *Proc. of the Sixth International Seminar on Fire & Explosion Hazards (FEH6)*, (ISBN-13:978-981-08-7724-8 e), 2010.
9. K. Galal, T. El-Sawy, "Effect of Retrofit Strategies on Mitigating Progressive Collapse of Steel Frame Structures," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 66, Issue. 4, pp. 520-531, 2011.
10. M. Haghaeigh, J. Asghari Marenani, M. Rohani Manesh, "Assessment of Sesmic Behavior Knee Brace Compared with X and Chevron Bracing in Steel Frame," *journal of structural engineering*, vol.12, issue.3, pp. 59-67, 2015. (In Persian)
11. H.D. Mahale, "Behaviour of Steel Structure under the Effect of Fire Loading," *International Journal of Engineering Research and Applications*, ISSN: 2248-9622, vol. 6, no. 5, pp. 42-46, 2016.
12. A. Parvini, A.H. Saadatmand Bahri, "Evaluation of Progressive Collapse Scenario in Steel Framed Structures with Knee Brace under Gravity and Seismic Load," *The Turkish Online Journal of Design, Art and Communication, TOJDAC*. Special Edition, DOI NO: 10.7456/1060AGSE/078, 2016.
13. J. Kim, A. Dawoon, "Evaluation of Progressive Collapse Potential of Steel Moment Frames Considering Catenary Action," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol.18, issue.4, pp.455-465, 2016.
14. X. Lu, Y. L. Hung Guan, M. Ying, "Progressive Collapse Analysis of a Typical Super-Tall Reinforced Concrete Frame-Core Tube Building Exposed to Extreme Fires," *FireTechnology*, vol. 53, no. 1, pp. 107-133, 2017.
15. G. Abdollahzadeh, R. Shalika, "Retrofitting of Steel Moment-Resisting Frames under Fire Loading against Progressive Collapse," *International Journal of Steel Structures*, vol. 17, no. 4, pp.1597-1611, 2017.
16. R. Rahnavard, N. Siahpolo, "Function Comparison between Moment Frame and Moment Frame with Centrally Braces in High-Rise Structures under effect of Progressive Collapse," *Iranian Structural Engineering Assosiation*

- ,*Sientific Research Journal (Structural and Construction Engineering)*, vol.4, Issue.4, no.14, PP.42-57, 2017.(In Persian)
17. B. Kordbagh, M. Mohammadi, "Influence of Panel Zone on Progressive Collapse Resistance of Steel Structures," *American Society of Civil Engineers*, vol. 32, issue. 3, 2018.
 18. M.R., Ameri, A. Massumi, H. Masoomi, "Effect of Structural Redundancy on Progressive Collapse Resistance Enhancement in RC Frame Structures," *Journal of Performance of Construced Facilities*, vol. 33, no. 1, 2018.
 19. M.R. Kafash, A. Karamodin, M. Moghiman, "Investigatin of the Behavior of Special Steel Concentrically Braced Frames under Post Earthquake Fire Loading," *Ferdowsi Civil Engineering Journal*, vol. 33, no. 29, PP. 31-48, 2020. (In Persian)
 20. E. Mohammadi Dehcheshmeh, M. Kamalizad, V. Broujerdian, G. Ghodrati Amiri, "Progressive Collapse in Steel Moment Frame Structures: Multi Parameter Study," *journal of structural and construction engineering*, vol. 9, no. 58, pp. 20-38, 2022. (In Persian)
 21. Y. Cao, J. Jiang, Y. Lu, W. Chen, J. Ye, "Progressive Collapse of Steel Structures Exposed to Fire: A Critical Review," *journal of constructional steel research*, vol.207, 107985, 2023.
 22. ABAQUS 6.14 Documentation, Dassault Systèmes Simulia Corp, 2014.
 23. M. Yahyai, A. Rezaeian, M. Safaeian, "Response of Steel Box Culmn in Fire Conditions," *Journal of Structural and Consruction Engineering*, vol. 4, Issue. 1, no.10, pp. 101-112, 2017. (In Persian)
 24. R. Sun,, Z. Huang, L. Burgess, "Progressive Collapse Analysis of Steel Structures under Fire Conditions," *Engineering structures*, vol.34, pp. 400-413, 2012.

Assesing the Impact of the Tuned Mass Damper on the Seismic Performance of Isolated Steel Structures using Endurance Time Analysis

Research Article

Milad Zarbilinezhad¹, Amin Gholizad² DOI: [10.22067/jfcej.2023.80516.1208](https://doi.org/10.22067/jfcej.2023.80516.1208)

1. Introduction

Structures are vulnerable to significant damages during seismic events, necessitating the implementation of effective measures to mitigate their response to ground motions. Isolated structures equipped with dampers have proven to be successful in reducing structural vibrations and improving seismic performance. Tuned Mass Dampers (TMDs) are widely used devices that effectively absorb and dissipate the energy induced by seismic forces. This study aims to assess the effectiveness of TMDs in enhancing the seismic performance of isolated steel structures by evaluating their impacts on displacement, drift ratio, and story shear forces.

2. Method

This study considered a 9-story steel building with a special steel bending frame system and 4 openings of 6 meters in the X direction. The structure was designed according to the Regulations of Building Design Against Earthquake” (Standard 2800, 4th Edition) and Design Code of Steel Buildings (AISC). The analysis was conducted using Endurance Time Analysis (ETA) method in SAP2000 software, considering both fixed and isolated base conditions to simulate the presence of tuned mass dampers. Various mass ratios of the tuned mass damper were considered to investigate their influence on the structural response regarding displacement, drift ratio, and story shear forces (

Figure 1).

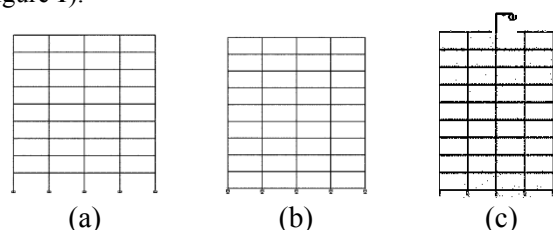


Figure 1. 9-Story structure: (a) without Base Isolation System, (b) equipped with LRB Base Isolation System, and (c) equipped with LRB Base Isolation System and TMD

3. Results

The results demonstrated the significant impact of the tuned mass damper on the seismic response of the isolated steel structure. The presence of the tuned mass damper leads to a substantial reduction in displacement, drift ratio, and story shear forces, indicating improved seismic performance. The effectiveness of the tuned mass damper increases with higher mass ratios, resulting in more significant reductions in displacement, drift ratio, and story shear forces. The performance of the isolator system in terms of hysteresis behavior was also evaluated. Key parameters such as the area under the hysteresis loop, maximum displacement, and maximum force on the surface of the isolator were considered. Increasing the mass ratio of the adjustable mass damper system by up to 7% resulted in favorable hysteresis behavior, with a 16% increase in wasted energy, a 31% decrease in maximum displacement, and a 25% decrease in maximum force in the isolator (Figure 2. The c).

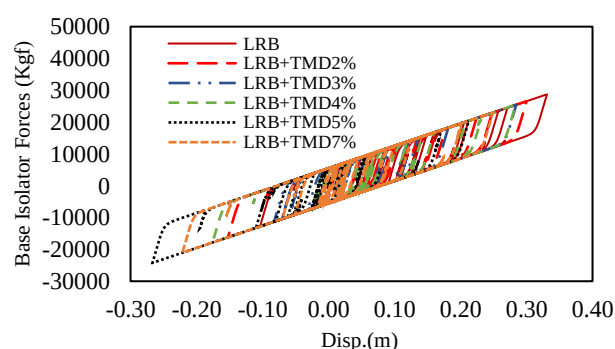


Figure 2. The comparison of hysteresis loops of base isolator with different mass ratios of tuned mass damper

Additionally, the response of the structure's stories was examined in terms of acceleration, displacement, relative displacement ratio, and story shear forces. The use of the adjustable mass damper system, along with the isolator system, improved the acceleration response of the

*Manuscript received: January 10, 2023, Revised, April 29, 2023, Accepted, June 11, 2023.

¹ Ph.D.Candidate in Structural Engineering, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

² Corresponding author. Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Email: gholizad@uma.ac.ir

controlled structure. However, it was observed that the effectiveness of the control system in improving the acceleration response decreases as the mass ratio of the damper increases. The displacement response of the stories and the relative displacement ratio of the isolated structure decreased significantly with the use of the adjustable mass damper, with higher damper mass ratios yielding more noticeable improvements. Similarly, the story shear forces experienced by the stories were reduced by approximately 10%, 20%, and 30% for mass ratios of 5%, 7%, and 10%, respectively, compared to the structure without any damper system. These results highlight the effectiveness of the adjustable mass damper system in reducing not only the displacement and drift ratios but also the story shear forces, contributing to the overall enhanced seismic performance of the isolated steel structure.

4. Conclusion

The results highlight that tuned mass dampers (TMDs) have a positive impact on the seismic performance of isolated steel structures. Integrating TMDs with seismic isolation systems improves various structural aspects, including reducing displacement, drift ratio, story shear forces, base shear ratio, and foundation cutting. The effectiveness of TMDs increases with higher mass ratios, enhancing seismic performance. TMDs also reduce plasticity in pavement and isolation systems, leading to cost-effective designs. However, limitations exist in reducing absolute acceleration response. Increasing the TMD mass ratio doesn't effectively improve absolute acceleration compared to isolated states. These results offer valuable insights for engineers and designers aiming to enhance the seismic performance of isolated steel structures by using tuned mass dampers.

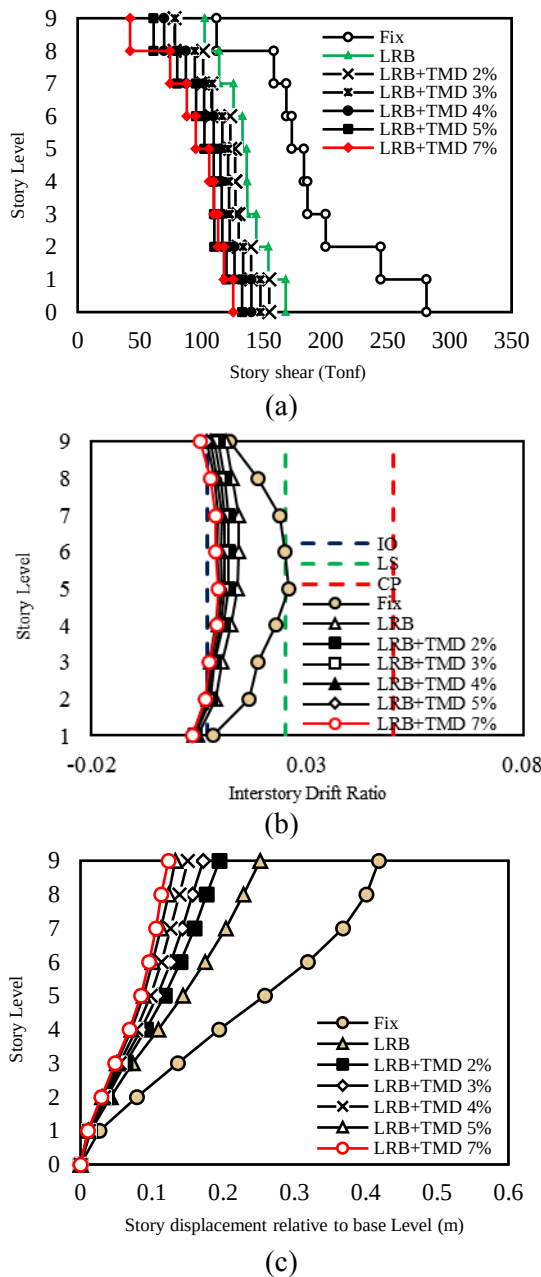


Figure 3. Seismic response of the structure's stories: (a) story shear, (b) inter-story drift ratio, (c) story displacement relative to base level, and (d) Absolute acceleration



ارزیابی تأثیر میراگر جرمی تنظیم شونده بر عملکرد لرزه‌ای سازه فولادی جداسازی شده با استفاده از تحلیل زمان دوام*

مقاله پژوهشی

امین قلی‌زاد^(۲)

میلاد زربیلی نژاد^(۱)

DOI: 10.22067/jfpei.2023.80516.1208

چکیده جداسازها و میراگرها، ابزارهای اتلاف انرژی برای کنترل و کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها تحت زمین‌لرزه‌های شدید محسوب می‌شوند. جداساز هسته سربی (LRB) و میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD) دو نمونه از متداولترین این ابزارها هستند. مطالعه رفتار غیرخطی و خواص لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای مجهز به این نوع جداسازها و میراگرها می‌تواند کمک قابل توجهی به درک رفتار این سیستم‌ها در برابر نیروهای جانبی ناشی از زمین‌لرزه‌های بزرگ نماید. در این پژوهش سازه فولادی ۹ طبقه طراحی شده، با استفاده از روش زمان دوام در حالت‌های با پایه ثابت و جداسازی شده به همراه میراگر با نسبت‌های جرمی مختلف و بدون میراگر جرمی در نرم‌افزار SAP2000 تحلیل شده است. نتایج تحلیل‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که وجود میراگر جرمی تنظیم شونده در کاهش میزان جابه‌جایی تراز جداساز، نسبت جابه‌جایی نسبی و نیروی برش طبقات بسیار مؤثر هست که با افزایش نسبت جرمی میراگر، این اثر بیشتر می‌گردد. ولی در کاهش پاسخ شتاب مطلق سازه مؤثر نبوده و با افزایش نسبت جرمی میراگر جرمی از کارایی سامانه کنترلی در بهبود پاسخ شتاب نسبت به حالت جداساز تنها کاسته می‌شود.

واژه‌های کلیدی جداساز لاستیکی هسته سربی، میراگر جرمی تنظیم شونده، تحلیل زمان دوام، سازه فولادی.

Assessment of the effect of the tuned mass damper on the seismic performance of isolated steel structures by using endurance time analysis

Milad Zarbilinezhad

Amin Gholizad

Abstract Isolators and dampers are devices that dissipate energy and reduce the seismic response of structures during strong earthquakes. Lead Rubber Bearings (LRBs) and Tuned Mass Dampers (TMDs) are two common types of these devices. Studying non-linear behavior and seismic properties of structural systems equipped with this type of isolators and dampers can significantly enhance understanding of their behavior against lateral forces caused by strong earthquakes. In this study, a 9-story steel structure was analyzed using the Endurance Time Analysis (ETA) method in SAP2000 software with fixed and isolated bases, along with a tuned mass damper with different mass ratios and without a tuned mass damper. The analysis results indicate that the tuned mass damper is highly effective in reducing the displacement of the isolator level, drift ratio, and story shear forces. This effect is more significant with higher mass ratios of the TMD. This effect is more pronounced with higher mass ratios of the TMD. However, reducing the absolute acceleration response of the structure has not been effective, and increasing the mass ratio of the TMD only reduces the performance of the control system in improving the absolute acceleration response compared to the isolated state.

Keywords Lead Rubber Bearing, Tuned Mass Damper, Endurance Time Analysis, Steel structure.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۰/۲۰ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۳/۲۱ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران - گرایش سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

مقدمه

در سال‌های اخیر، بهبود عملکرد لرزه‌ای و افزایش ایمنی ساختمان‌ها، با پیشرفت فناوری، اهمیت زیادی پیدا کرده است. از آنجایی که تجهیزات گران‌قیمت و حساس در ساختمان‌های امروزی، برای امور آموزشی، پزشکی، بازرگانی و خدماتی موجود است که از اهمیت زیادی در عملکرد مناسب جامعه و زندگی مردم برخوردار است؛ از این رو ساختمان‌ها غالباً نسبت به تجهیزات موجود ارزش کمتری دارند. یکی از راهکارهای پیشنهادی جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها، بهره‌گیری از سامانه‌های کنترل لرزه‌ای می‌باشد. روش‌های کنترل ارتعاش سازه‌ها، شامل روش کنترل غیرفعال، فعال، نیمه‌فعال و ترکیبی می‌باشد. در روش‌های کنترل غیرفعال، ابزار کنترل‌کننده ارتعاش، در محل مناسبی از سازه قرار می‌گیرد و تا قبل از تحریک سازه، به‌صورت غیرفعال باقی می‌ماند. با شروع تحریک (باد، زلزله و...)، ابزار کنترلی، عملکرد کنترلی خود را انجام می‌دهد و پس از پایان یافتن تحریک، مجدداً به حالت غیرفعال باز می‌گردد. میراگرهای ویسکوالاستیک (Viscoelastic Damper (VED)، میراگرهای اصطکاکی (Friction Dampers)، میراگرهای جرمی تنظیم شونده (Tuned Mass Damper (TMD)، جداسازهای لاستیکی (Elastomeric Isolators) و جداسازهای اصطکاکی (Friction Isolators) نمونه‌هایی از ابزارهای کنترلی غیرفعال می‌باشند [1-3].

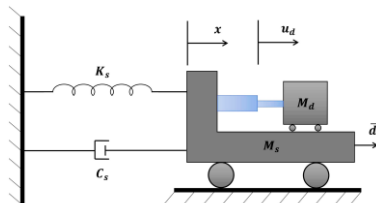
در سال ۱۹۰۹، فرام [4] برای اولین بار، ایده اصلی میراگرهای جرمی تنظیم شونده به‌عنوان یک سامانه میراگر برای کاهش حرکات نوسانی کشتی‌ها، مطرح نمود. در همین راستا در ادامه کارهای فرام، این سامانه، مورد توجه محققان قرار گرفت و چندین محقق، این سامانه را جهت کنترل ارتعاشات مورد بررسی قرار دادند. در سال ۱۹۲۸، اورموندروید و دن هارتوگ [5,6] به ارائه مدل کاملتر از سامانه میراگر جرمی تنظیم شونده پرداختند. نتیجه این مطالعه نشان داد که اضافه کردن میرایی به میراگر جرمی تنظیم شونده، باعث افزایش بازده آن می‌شود [7]. در سال ۱۹۸۲ واربرتون [8] جهت حل مسئله کنترل تحریکات و به دست آوردن پاسخ‌ها، از روش‌های دیگری استفاده کرد. با به کار گرفتن این روش‌ها، واربرتون توانست روابطی را به دست آورد که در مسائل چند درجه آزادی قابل استفاده باشد. در سال ۱۹۹۳، تسای و لین [9] به مطالعه بر روی سیستم‌های

چند درجه آزادی مجهز به سامانه میراگر جرمی تنظیم‌شونده پرداختند. آنها در این مطالعه، برای سیستم‌های چند درجه آزادی مجهز به میراگر جرمی تنظیم‌شونده روش‌های حل به صورت کلاسیک به دست آوردند و همچنین جهت یافتن پارامترهای بهینه این میراگر، منحنی‌هایی را نیز ارائه دادند. در مطالعه‌ای که چنگ [10] در سال ۱۹۹۹ بر روی سیستم تک درجه آزادی مجهز به جرمی تنظیم‌شونده تحت اثر نیروی زلزله و باد انجام داد، نشان داد که میراگر جرمی تنظیم‌شونده در کاهش پاسخ سازه تحت اثر نیروی زلزله و باد کارآمد است. همچنین روابطی را برای جهت حل مسئله کنترل تحریکات تحت نیروی زلزله و باد پیشنهاد نمود. از طرفی محققان دیگری از جمله کانیا و همکاران [11] و گوپتا [12] عکس این موضوع را نشان دادند. آنها نشان دادند، استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شونده در کاهش پاسخ سازه تحت اثر نیروی زلزله کارآمد نیست که ویلارد و همکاران [13] در سال ۱۹۹۴ دلایلی را برای تفاوت این تحقیقات که نشان‌دهنده عدم کارایی سامانه میراگر جرمی تنظیم‌شونده در زلزله بود را پیشنهاد کردند. در این مطالعه به این نتیجه رسیدند که دلیل عدم کارایی سامانه میراگر جرمی تنظیم‌شونده در بعضی تحقیقات، بهینه نکردن درست پارامترهای این میراگر می‌باشد. نتیجه این مطالعه نشان داد که جهت کارایی درست سامانه میراگر جرمی تنظیم‌شونده، فرکانس میراگر باید در نزدیکی فرکانس مود اصلی سازه تنظیم شود.

تی پینکاو و همکاران [14] در سال ۲۰۰۲ کارایی میراگر جرمی تنظیم‌شونده را در کاهش میزان خرابی‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که با وجود عدم کاهش قابل توجه در تغییر مکان حداکثر سازه، مقاومت سازه در برابر تخریب افزایش پیدا می‌کند. در سال ۲۰۱۵، ناطقی [15] اثر میراگر جرمی تنظیم‌شونده بر روی پاسخ لرزه‌ای قاب‌های ساختمانی با عدم قطعیت در خصوصیات سازه‌ای را مورد بررسی قرار داد. نتایج این مطالعه نشان داد که برای زلزله‌های دور از گسل با دوره تناوب میانگین پایین، احتمال وقوع خرابی در سازه مجهز به میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده کمتر از سازه اصلی است و تأثیر استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شونده با مشخصات مختلف در طبقات مختلف سازه متفاوت است. باتو و آدیکاری [16] در سال ۲۰۱۹ با بررسی پارامترهای مطلوب در

مبانی میراگرهای جرمی تنظیم شونده (TMD)

یک سامانه میراگر جرمی تنظیم شونده، ابزاری متشکل از جرم، فنر و میراگر است که به سازه متصل شده و با تطبیق بسامد خود با بسامد سازه، در فاز مخالف حرکت سازه ارتعاش می‌کند و با اعمال نیروی اینرسی بر سازه، فرکانس تحریک را مستهلک کرده و باعث کاهش پاسخ دینامیکی سازه می‌شود. در این نوع از میراگرها، فنر بین تکیه‌گاه ثابت قائم و جرمی که بر روی تکیه‌گاه‌های غلتکی قرار دارد، قرار می‌گیرد (شکل ۱). معمولاً این نوع از میراگرها در تراز طبقات بالا قرار می‌گیرند و با اعمال تحریک به سازه و تجاوز از شتاب مشخص که در طراحی میراگر در نظر گرفته می‌شود، عملکرد کنترلی خود را انجام می‌دهد و پس از پایان یافتن تحریک، مجدداً به حالت غیرفعال باز می‌گردد. معمولاً جنس جرم این سامانه از سرب، بتن یا فولاد است و به صورت مجموعه‌ای یا تک به ابعاد ۵ تا ۱۰ متر و به شکل مستطیل یا مربع ساخته و در تراز طبقات بالایی سازه نصب می‌شوند [20].



شکل ۱ نمایش شماتیک از نحوه عملکرد میراگر جرمی تنظیم شده [21]

مبانی سامانه‌های جداساز لرزه‌ای

جداساز لرزه‌ای یکی از مؤثرترین روش‌ها، برای کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها، در زمان رخداد زلزله می‌باشد که با جداکردن کردن کل یا بخشی از سازه از قسمت‌های دیگر سازه یا زمین انجام می‌شود. در این روش، با به وجود آمدن تغییرشکل‌های بزرگ، در خود سامانه جداساز، زمان تناوب کلی سازه افزایش می‌یابد که این امر موجب کاهش نیروهای زلزله وارد بر اجزای سازه و نیز تغییر مکان نسبی آن می‌شود. همچنین با فراهم نمودن میرایی لازم از طریق سامانه‌های جداساز لرزه‌ای، نه تنها، نیاز سازه کم می‌شود؛ بلکه ظرفیت سازه نیز افزایش می‌یابد. در عین حال، افزایش میرایی، نیروی منتقل شده به سازه را نیز افزایش می‌دهد که این نکته باید در طراحی سامانه‌های جداساز لرزه‌ای رعایت شود [22,23]. جداسازهای لرزه‌ای به طور کلی به دو

میراگرهای جرمی به این نتیجه رسیدند که استفاده از میراگر جرمی تنظیم‌شونده ویسکوالاستیک، امکان جذب لرزش عالی در مقایسه با میراگر جرمی تنظیم شده معادل به صورت معکوس را دارد. وان تیل و همکاران [17] در سال ۲۰۱۹ در پژوهشی به مدل‌سازی دامنه فرکانس غیرخطی برای میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده تحت تحریک تک و چندگانه هارمونیک پرداختند و دریافتند که میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده چندگانه (Bi-directional Tuned Mass Damper (BTMD)، یک استراتژی کنترل لرزشی مؤثر هست که می‌تواند از طریق گزینه‌های مختلف میرایی اجرا شوند و دو مکانیسم اصطکاک همگن و تماسی، نمونه‌های رضایت‌بخشی برای ایجاد دامنه مستقل در سامانه‌های پاندولی می‌باشند. در سال ۲۰۲۰، استانی‌کزی و همکاران [18] در مطالعه‌ای به بررسی پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های بتنی مجهز به سامانه جداساز پایه و میراگر جرمی تنظیم شده پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد، کارایی میراگر جرمی تنظیم‌شونده با افزایش دوره تناوب سامانه جداساز (کاهش سختی سامانه جداساز)، کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۲۲، وانگ و همکاران [19] در مطالعه‌ای به ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سازه مجهز به سامانه جداساز همراه با سامانه میراگر تنظیم‌شونده نیمه‌فعال پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد استفاده از سامانه میراگر تنظیم‌شونده نیمه‌فعال همراه با سامانه جداساز، پاسخ شتاب و جابه‌جایی تراز سامانه جداساز را در زلزله‌های حوزه نزدیک گسل بهبود می‌بخشد.

در این پژوهش، یک سازه ۹ طبقه قاب خمشی ویژه فولادی بدون سامانه جداساز، جداسازی شده و سامانه‌های جداسازی شده با میراگرهای جرمی تنظیم‌شونده با نسبت‌های جرمی مختلف با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 مدل‌سازی شده و با استفاده از روش زمان دوام به صورت غیرخطی تحلیل و پاسخ‌های حاصل از تحلیل ارائه شده است. پاسخ‌های لرزه‌ای از جمله برش پایه، جابه‌جایی، دررفت و شتاب طبقات و همچنین اثر افزایش نسبت جرمی میراگر جرمی تنظیم‌شونده بر منحنی‌های هیستریزس، اتلاف انرژی هیستریزس و نیروی برشی به وجود آمده در سامانه جداساز به دست آورده شده و مقایسه‌های لازم صورت پذیرفته است تا میزان تأثیر میراگر جرمی تنظیم‌شونده در بهبود و برطرف کردن رفتار نامناسب سامانه جداساز بررسی شود.

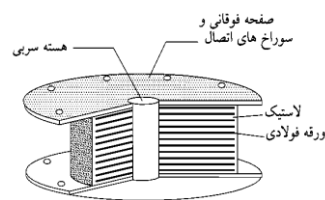
معرفی روش زمان دوام

ایده اولیه روش زمان دوام برای اولین بار توسط استکانچی و همکاران در سال ۲۰۰۴ ارائه شد [25]. در این روش، سازه‌ها تحت یک تابع شتاب فزاینده کالبره شده قرار می‌گیرند و عملکرد آنها در طول زمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. در اینجا، واژه تابع شتاب (Accelerogram Function) به کار رفته است تا با مفهوم شتاب‌نگاشت، چه مصنوعی و چه طبیعی، اشتباه گرفته نشود [26]. مفهوم روش زمان دوام با استفاده از یک آزمایش فرضی توضیح داده می‌شود. این آزمایش به این صورت است که سه سازه مختلف با خصوصیات نامشخص بر روی میز لرزان، تحت ارتعاش تصادفی که شدت آن به تدریج افزایش پیدا می‌کند، در نظر گرفته می‌شود (شکل). در شروع آزمایش، هنگامی که دامنه ارتعاشات کم است، هر سه سازه پایدار خواهند بود. با گذشت زمان و افزایش شدت تحریک، گسیختگی‌های سازه‌ای توسعه یافته و در صورتی که سطح شدت تحریک از سطح ظرفیت سازه فراتر رود، فروریزش رخ می‌دهد. حال با فرض این که با گذشت زمان و افزایش شدت تحریک ابتدا سازه «A»، سپس سازه «C» و در نهایت سازه «B» تخریب شود، نتیجه گرفته می‌شود، سازه «A» که نسبت به تحریک دینامیکی اعمال شده کمترین زمان دوام را داشته، ضعیف‌ترین عملکرد و سازه «B» که مدت طولانی‌تری دوام آورده، بهترین عملکرد را دارد. تفاوت در زمان‌های دوام در این سازه‌ها، می‌تواند به طور نسبی بیانگر ریسک لرزه‌ای آنها در فروریزش، تحت رخدادهای زلزله باشد. در نتیجه با استفاده از مفاهیم ساده فوق، روش زمان دوام به عنوان یک ابزار تحلیلی کاربردی، مسیر را برای ارزیابی لرزه‌ای و طراحی سازه‌ها بر اساس عملکرد هموار می‌کند. نکته حائز اهمیت این است که نتیجه‌گیری بالا صرفاً با مشاهده رفتار دینامیکی سازه‌ها به دست آمده است و هیچ نیازی به دانستن مشخصات دینامیکی سازه‌ها پیش از انجام آنالیز وجود ندارد. البته همین خصوصیات دینامیکی هستند که زمان دوام سازه را تعیین می‌کنند؛ اما در آزمایش ملاک برتری زمان دوام می‌باشد [25].

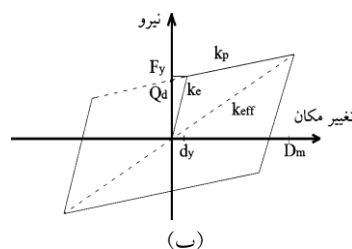
همان طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، نتایج آزمایش فرضی در قالب منحنی پاسخ سازه مقابل شدت زلزله رسم شده است. در این نمودار، محور افقی، زمان را از ابتدای اعمال بارگذاری، و محور قائم در هر زمان برابر پاسخ حداکثر مطلق مقادیر پارامتر مورد نظر سازه، از شروع تا زمان مورد نظر می‌باشد. این مقدار با استفاده از رابطه (۱) به دست آورده

دسته جداسازهای اصطکاکی و جداسازهای لاستیکی تقسیم بندی می‌شود که در ادامه توضیح مختصری در مورد یک نمونه از سامانه‌های جداساز لاستیکی که متداولترین سامانه جداسازی لاستیکی است و در این مطالعه نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد، داده می‌شود.

سامانه جداساز لاستیکی هسته سربی، از جداسازهای لاستیکی به شمار می‌رود که از چند لایه ورقه‌ای شامل لایه‌های فولادی و لاستیکی که به صورت یک در میان قرار می‌گیرند و یک یا چند سوراخ دایره‌ای شکل که محل قرارگیری هسته‌های سربی هستند و همچنین دو ورق فوقانی و تحتانی تشکیل می‌شوند. دلیل انتخاب سرب برای این نوع از سامانه جداساز، ویژگی ساختمان کریستالی سرب می‌باشد که تحت بارهای ارتعاشی دینامیکی جانبی، تسلیم‌های متوالی در هسته سربی اتفاق می‌افتد، باعث ایجاد پدیده خستگی نشود (شکل ۲-الف). این جداساز در زمینه کنترل توأم لرزه‌های شدید و خفیف، به دلیل داشتن رفتار دوخطی با نرم‌شدگی تحت بارهای نسبتاً شدید لرزه‌ای، عملکرد مطلوبی از خود نشان داده‌اند. سختی اولیه این سامانه جداساز شامل سختی بخش سربی و بخش لاستیکی هست که سختی بخش لاستیکی در مقایسه با سختی بخش سربی بسیار اندک است (شکل ۲-ب).



(الف)



شکل ۲ الف) شکل شماتیک اجزای جداساز لاستیکی هسته سربی
ب) رفتار غیر خطی جداساز لاستیکی با هسته سربی [24]

قابل قبولی از آثار ناشی از زلزله در سازه گردد. از بین توابع شتاب زمان دوام که تا به امروز توسعه یافته‌اند، مجموعه توابع شتاب سری in مجموعه‌ای است که طیف هدف آنها در فرایند تولید، طیف حاصل از ۲۰ زلزله واقعی به کار رفته در FEMA440 [28] بوده و برای تحلیل حوزه غیرخطی تهیه شده‌اند. این سری از توابع شتاب زمان دوام به گونه‌ای تولید شده که در محدوده غیرخطی پاسخ مناسبتی ارائه می‌کند. به این ترتیب به جای انتخاب ۲۰ شتاب‌نگاشت واقعی زلزله و مقیاس‌سازی آنها، می‌توان از سری شتاب‌نگاشت in زمان دوام استفاده کرده و با حجم محاسبات بسیار کمتری به نتایج مورد نظر دست یافت. از این رو در این پژوهش از سه رکورد ETAINx01-03 استفاده می‌شود.

راستی آزمایی

جهت راستی آزمایی مدل‌سازی و بررسی نتایج نرم‌افزار از مطالعات آزمایشگاهی وو و سمالی [29] که در سال ۲۰۰۲ در آزمایشگاه سیدنی در استرالیا، آزمایش‌های خود را در دو حالت سازه با پایه گیردار و سازه با جداساز انجام داده‌اند، انتخاب شده است. ارتفاع کلی مدل آزمایشگاهی که یک سازه فولادی ۵ طبقه می‌باشد، ۳ متر بوده که هر کدام به ارتفاع یکسان ۶۰۰ میلی‌متر و با ابعاد ۱/۵×۱/۵ متر می‌باشد. سیستم سازه‌ای از نوع سیستم قاب خمشی بوده که در یک راستا دارای ۲ دهانه و در سمت دیگر دارای ۱ دهانه می‌باشد. سختی جداسازهای مورد استفاده در این مدل آزمایشگاهی برابر با ۲۱۲ کیلو نیوتون بر متر بوده و تیرهای تمامی طبقات به صورت مقاطع توخالی مربعی به ابعاد ۷۵×۷۵×۴ میلی‌متر و سختی جانبی آن توسط ستون‌هایی با مقطع مربعی توپر به ابعاد ۲۵×۲۵ میلی‌متر تأمین می‌شود (شکل ۴).

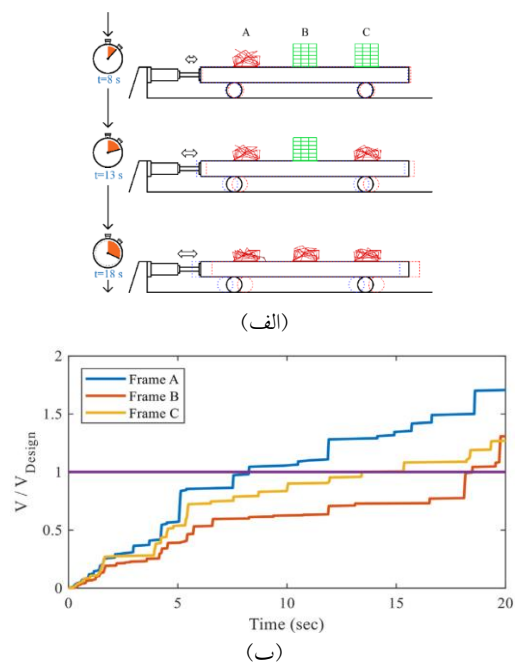
مدل در دو حالت پایه گیردار و جداسازی شده در راستای افقی (در راستای دارای دو دهانه) تحت زلزله نورث‌بریج (Northridge)، قرار گرفته و تحلیل تاریخیچه زمانی بر روی آن انجام شده است. نکته مهمی که شایان ذکر است، این است که برای برقراری تشابه دینامیکی، نسبت به حالت واقعی، رکورد مورد استفاده در پژوهش وو و سمالی، در محور زمان با ضریب « $\frac{1}{3}$ » مقیاس شده است.

ابتدا در شکل (۵) پاسخ مودهای مختلف ارتعاشی سازه فلزی ۵ طبقه حاصل از مدل‌سازی با نتایج گزارش شده توسط وو و سمالی مقایسه شده است. مقایسه اشکال مختلف مودی

می‌شود. از آنجایی که بارگذاری در طول زمان به تدریج افزایش می‌یابد، در این آزمایش، زمان می‌تواند معرف شدت بارگذاری باشد. در عمل، زمان به آسانی قابل نگاشت به شاخص‌های شدت زلزله، نظیر شتاب بیشینه زمین (PGA)، شتاب طیفی (S_a)، دوره بازگشت و سایر شاخص‌های شدت مورد نظر می‌باشد.

$$\Omega(f(t)) = \text{Max}(|f(\tau)|) 0 \leq \tau \leq t \quad (1)$$

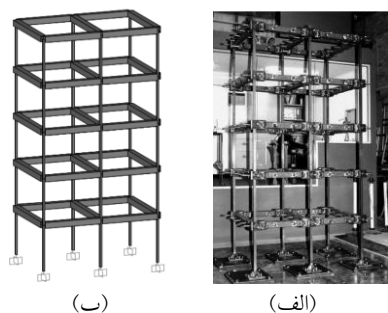
در رابطه فوق « Ω » مقدار حداکثر پاسخ تا زمان « t » و « f » تاریخیچه پاسخ می‌باشد. پارامتر پاسخ مورد نظر، می‌تواند شامل پاسخ‌های ساده نظیر تغییر مکان نیرو، تنش و یا شاخص‌های پیچیده‌تر نظیر دوران خمیری، شاخص‌های خرابی، هزینه‌های خرابی و... باشد.



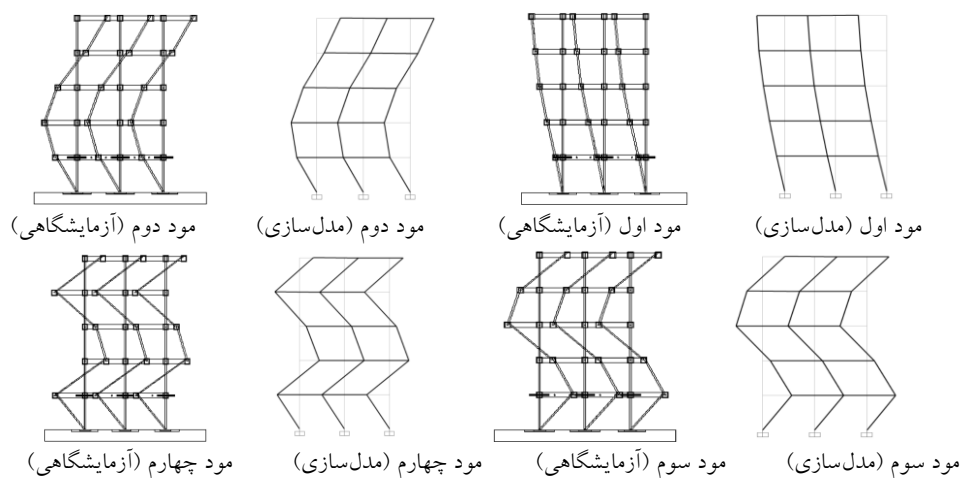
شکل ۳ الف) آزمایش فرضی قاب‌ها تحت ارتعاش اتفاقی افزایشنده و ب) نمودار پاسخ قاب‌ها تحت ارتعاش اتفاقی افزایشنده [27]

روش زمان دوام مشابه آنالیز دینامیکی فزاینده بر پایه روش تاریخیچه زمانی است، با این تفاوت که ورودی لرزه‌ای مخصوص به خود را دارد که این ورودی لرزه‌ای از آن جهت که مبنایی متفاوت با شتاب‌نگاشت‌های طبیعی و مصنوعی دارد «تابع شتاب» نامیده می‌شود. کاربرد عملی روش زمان دوام نیز منوط به تولید توابع شتاب (توابع تحریک) فزاینده‌ای است که نتایج حاصل از تحلیل با استفاده از آنها منجر به تخمین

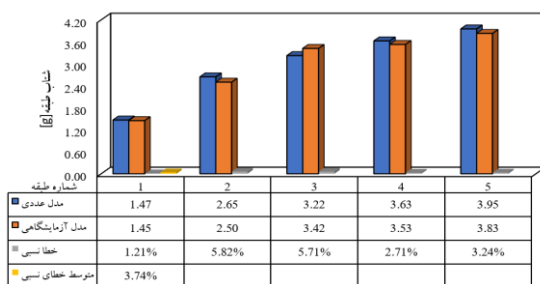
نشان از دقت مناسب مدل سازی دارد.



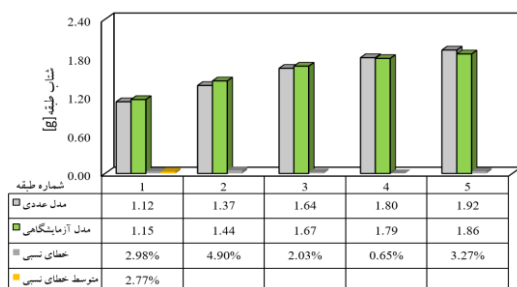
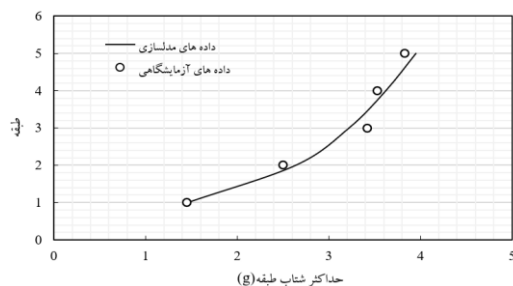
شکل ۴ مدل مبنای ساختمان فلزی ۵ طبقه دانشگاه سیدنی [29]: (الف) مدل آزمایشگاهی و (ب) مدل عددی در محیط نرم افزار



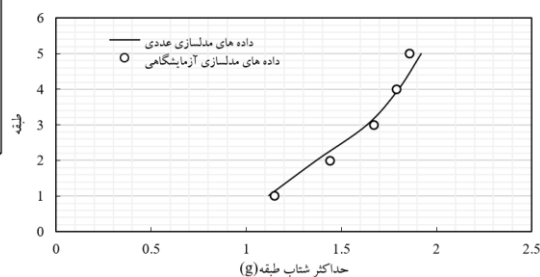
شکل ۵ مقایسه مدهای مختلف ارتعاشی سازه مدل آزمایشگاهی و عددی



شکل ۶ مقایسه حداکثر شتاب طبقات سازه پایه گیردار مدل عددی و آزمایشگاهی



شکل ۷ مقایسه شتاب طبقات سازه جداسازی شده مدل سازی شده و آزمایشگاهی



عرض بارگیر ۴ متر در نظر گرفته شده است. در طراحی ستون‌ها و تیرها از مقاطع بال پهن (Wide Flang) (تیر آهن W) استفاده شده است (جدول ۲). ارتفاع کلیه طبقات برابر ۳/۲ متر است. کلیه ضوابط «آیین‌نامه طراحی ساختمان در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ - ویرایش چهارم)»، «آیین‌نامه طراحی ساختمان‌های فولادی (AISC)» [31]. در طراحی سیستم مذکور استفاده شده است و مشخصات مصالح مصرفی برای تیر و ستون از جنس فولاد ST37 می‌باشد. مشخصات توابع شتاب زمان دوام مورد استفاده در این مطالعه در جدول (۲) آورده شده است. سازه‌های مورد مطالعه همان طور که قبلاً ذکر شد، به صورت بدون سامانه جداساز، مجهز به سامانه جداساز LRB و مجهز به سامانه جداساز LRB و TMD با نسبت جرمی ۲٪، ۳٪، ۴٪، ۵٪ و ۷٪ درصد مدل‌سازی شده و با استفاده از روش زمان دوام تحلیل می‌شوند.

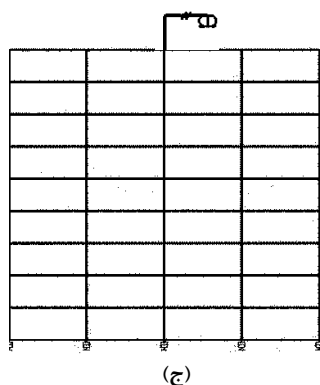
همان‌طور که ملاحظه شد، مقادیر شتاب طبقات حاصل از مدل‌سازی سازه با پای گیردار و جداسازی شده در نرم‌افزار SAP2000، نزدیک به نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی و و شمالی [29] است که این امر بیانگر تأیید عملکرد نرم‌افزار مذکور و صحت مدل‌سازی انجام شده می‌باشد.

سازه مورد مطالعه

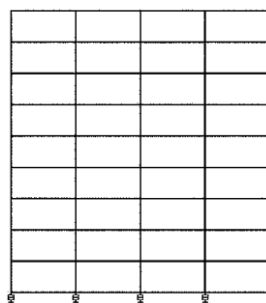
در این مطالعه ساختمان فولادی ۹ طبقه به صورت دو بعدی با سیستم قاب خمشی فولادی ویژه دارای ۴ دهنه ۶ متری در راستای X است (شکل ۸). محل احداث سازه در منطقه‌ای با خطر لرزه‌خیزی خیلی زیاد و سازه در زمینی با خاک تیپ II استاندارد ۲۸۰۰ [30] احداث شده است. سازه دارای کاربری مسکونی است؛ بنابراین طبق استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم در دسته ساختمان‌های با اهمیت متوسط قرار می‌گیرد. بار مرده و زنده طبقات به ترتیب ۶۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع با

جدول ۱ مقاطع مورد استفاده در سازه‌های مورد مطالعه

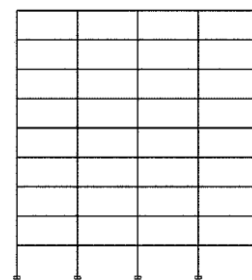
طبقه	مقطع ستون سازه ۹ طبقه	مقطع تیر سازه ۹ طبقه
۱-۳	W12X279	W18X50
۴-۶	W12X152	W16X50
۷-۹	W12X120	W14X53



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۸ سازه ۹ طبقه: (الف) بدون سامانه جداساز، (ب) مجهز به سامانه جداساز LRB، (ج) مجهز به سامانه جداساز LRB و میراگر TMD

جدول ۲ مشخصات کلی مجموعه توابع تحریک زمان دوام مورد استفاده در این مطالعه

نام مجموعه رکورد	تعداد رکورد	طیف الگوی هدف	طول زمان (ثانیه)	توضیحات
ETA20inx	۳	متوسط طیف ۲۰ رکورد FEMA 440 نوع C، بهینه شده در ناحیه غیرخطی، هر مؤلفه جداگانه	۲۰	مناسب برای مدل‌های خطی، غیرخطی

$$K_{eff} = \frac{W_{DL+0.25LL}}{g} \times \left(\frac{2\pi}{T_D}\right)^2 \quad (1)$$

جدول ۳ مشخصات لاستیک جداساز مورد استفاده [24]

مدول یانگ $E \left(\frac{KN}{m^2}\right)$	۵۸۵۰
مدول برشی $G \left(\frac{KN}{m^2}\right)$	۱۳۷۰
ضریب اصلاحی k	۰/۵۴

در رابطه (۱) منظور از $W_{DL+0.25LL}$ مقدار کل وزن مؤثر لرزه‌ای سازه است که در این مطالعه وزن مرده به همراه ۲۵ درصد بار زنده ($\alpha = 25\%$) به عنوان کل وزن مؤثر لرزه‌ای در نظر گرفته شده است. در قدم بعدی مقدار تغییر مکان طرح با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$D_D = \frac{g}{4\pi^2} \times \frac{A \times (S+1) T_S^3 \times T_D}{B_D} \quad (2)$$

حال با محاسبه مقدار تغییر مکان طرح بایستی مقدار نیروی تسلیم اولیه (مقاومت مشخصه) با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شود:

$$Q_d \cong \frac{\pi K_{eff} D_D \xi_{eff}}{2} \quad (3)$$

در قدم بعد، مقدار نیروی تسلیم اولیه (مقاومت مشخصه) مقدار سختی پس از تسلیم (سختی ثانویه) با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$K_d = K_{eff} - \frac{Q_d}{D_D} \quad (4)$$

میزان سختی الاستیک در این مطالعه بر اساس تحقیقات نعیم و کلی [32] برای جداسازهای هسته سربی ۱۰ برابر سختی پس از تسلیم در نظر گرفته می‌شود:

$$K_e \approx 10K_d \quad (5)$$

با مشخص شدن سختی الاستیک (سختی اولیه) و سختی پس از تسلیم (سختی ثانویه) مقدار جابه‌جایی تسلیم با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$D_y = \frac{Q_d}{K_e - K_d} \quad (6)$$

طراحی میراگرهای جرمی تنظیم شونده و جداسازهای

لاستیکی با هسته سربی

طراحی جداساز لاستیکی با هسته - سربی (LRB). هر چند با توجه به موقعیت قرارگیری ستون‌ها، سهم ستون‌ها از وزن مؤثر لرزه‌ای ساختمان متفاوت می‌باشد، ولی با توجه به اینکه در این مطالعه، هدف ارزیابی پاسخ سازه‌های مجهز به سامانه جداسازی شده با اضافه نمودن میراگر جرمی تنظیم شونده با نسبت‌های جرمی مختلف می‌باشد؛ از این رو برای کلیه ستون‌ها در سازه مورد مطالعه، یک تیپ سامانه جداساز طراحی و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

نوع خاک محل سازه نقش به‌سزایی در طراحی جداساز لرزه‌ای دارد. در این مطالعه نتایج برای ساختمان واقع بر روی خاک نوع II با خطر نسبی خیلی زیاد بررسی و مقایسه‌های لازم انجام می‌شود.

مشخصات زیر برای سامانه جداساز لاستیکی هسته سربی فرض می‌شود:

- دوره تناوب طبیعی جداسازها (T_D) ۲/۵ ثانیه در نظر گرفته شده است.
- نسبت میرایی معادل مؤثر برابر (ξ_{eff}) ۱۵ درصد در نظر گرفته شده است.
- ضریب میرایی (B_D) برای جداساز با نسبت میرایی معادل مؤثر برابر (ξ_{eff}) ۱۵ درصد براساس مفاد دستور العمل طراحی برابر با ۱/۳۵ در نظر گرفته شده است [24].
- تنش تسلیم سرب (f_{py}) برابر با ۸۸۲۰ کیلونیوتن بر متر مربع در نظر گرفته شده است.
- حداکثر تغییر شکل نسبی کششی لاستیک در زمان گسیختگی (ϵ_B) ۵۰۰ درصد در نظر گرفته شده است.
- حداکثر تغییر شکل برشی (γ_{max}) برابر با ۱۵۰ درصد در نظر گرفته شده است.
- مقدار ضریب شکل (S) برابر با ۱۵ در نظر گرفته شده است.

نوع لاستیک به کار رفته در جداساز از نوع IRHD-65 می‌باشد که خصوصیات آن در جدول (۳) آورده شده است.

برای طراحی سامانه جداساز LRB طبق دستور العمل نشریه ۵۲۳ در قدم نخست با توجه به فرضیات انجام‌گرفته مقدار سختی افقی مؤثر با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

در رابطه (۹) α نسبت فرکانسی (نسبت فرکانس میراگر جرمی تنظیم شونده به فرکانس مود اول سازه) است که بین ۰/۹ تا ۱ متغیر است [33]. در این مطالعه به جهت این که تنها تأثیر درصد جرمی در بهبود پاسخ سازه مجهز به سامانه جداساز لرزه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد، از این رو مقدار ۰/۹۵ برای کلیه مدل‌ها در نظر گرفته می‌شود و T_s دوره تناوب مود اول سازه می‌باشد. در ادامه ضریب میرایی کل سامانه میراگر جرمی تنظیم شونده نیز از رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$c_d = 4\pi\mu\alpha\xi\frac{M_s}{T_s} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) ξ نسبت میرایی TMD می‌باشد. مناسبترین نسبت میرایی میراگر بین ۲۰ تا ۳۰ درصد می‌باشد که در این مطالعه ۳۰ درصد در نظر گرفته شده است [33]. در این مطالعه، پنج نسبت جرمی (۲٪، ۳٪، ۴٪، ۵٪ و ۷٪) برای میراگر جرمی تنظیم شونده استفاده شده است که با قرارگیری میراگرها بر روی طبقه آخر، پنج مدل سازه ساختمانی با میراگر جرمی تنظیم شونده مورد بررسی قرار می‌گیرد. با استفاده از روابط (۹-۱۱) مشخصات میراگرهای جرمی تنظیم شونده به کار رفته در این مطالعه محاسبه شده و به صورت خلاصه در جدول (۵) آورده شده است. لازم به ذکر است که برای مدل کردن میراگر جرمی تنظیم شونده از المان لینک (link) از نوع Linear استفاده شده می‌شود. لینک خطی مورد نظر از یک طرف به یک جرم متمرکز و از طرف دیگر به سازه متصل شده است.

در نهایت آخرین پارامتر مورد نیاز جهت مدل رفتاری، نیروی تسلیم جداساز است که با استفاده از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$F_y = Q_d + K_d D_y \quad (7)$$

با استفاده از روابط (۸-۲) مشخصات جداساز به کار رفته در این مطالعه محاسبه شده و به صورت خلاصه مشخصات مدل دوخطی جداساز در جدول (۴) آورده شده است. لازم به ذکر است که برای مدل کردن سامانه جداساز لاستیکی با هسته سربی از المان لینک (link) از نوع Rubber Isolator استفاده شده است.

طراحی میراگر جرمی تنظیم شونده (TMD). برای طراحی میراگرهای جرمی تنظیم شونده در مدل سازه‌ای، یکی از اصلیتیرین پارامترها جرم میراگر می‌باشد. معمولاً جرم میراگر به صورت درصدی از جرم کل سازه بیان می‌شود.

$$m_d = \mu \times M_s \quad (8)$$

در رابطه (۸) μ نسبت جرمی، m_d جرم میراگر و M_s جرم کل سازه است. نسبت جرمی بین ۱ تا ۲۰ درصد متغیر است [33]. مقدار سختی کل نیز با استفاده از رابطه (۸) قابل محاسبه است:

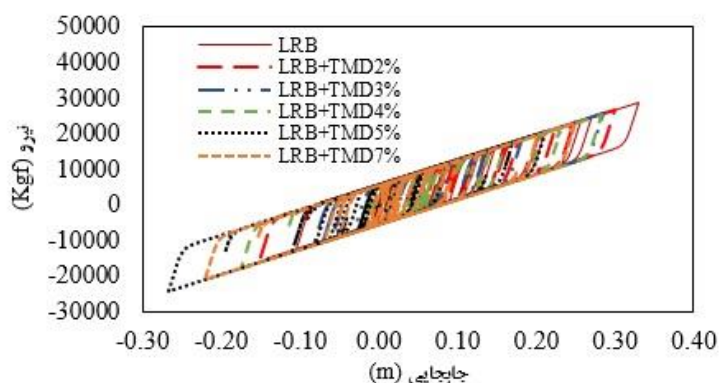
$$k_d = 4\pi^2\mu\alpha^2\frac{M_s}{T_s^2} \quad (9)$$

جدول ۴ مشخصات مدل دوخطی جداسازها

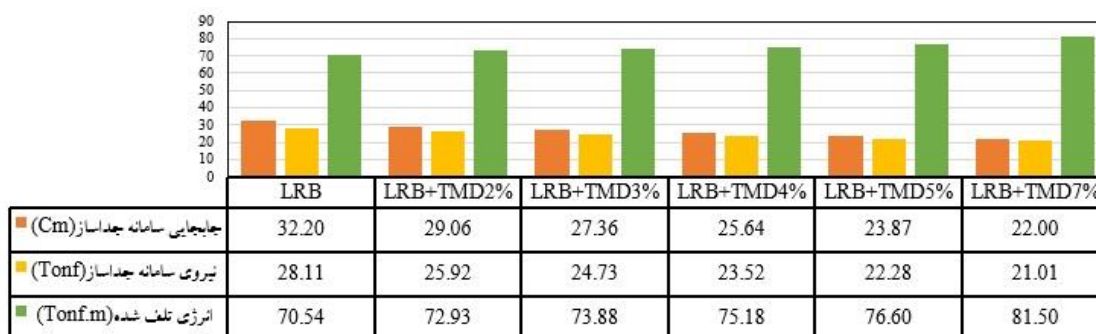
موقعیت قرارگیری جداساز لرزه‌ای	تغییر مکان طرح سامانه جداساز لرزه‌ای $D_D(cm)$	جابه‌جایی تسلیم $D_y(mm)$	سختی مؤثر $K_{eff}(\frac{Tonf}{m})$	سختی ثانویه $K_d(\frac{Tonf}{m})$	سختی اولیه $K_e(\frac{Tonf}{m})$	مقاومت مشخصه $Q_d(Tonf)$
تراز پایه	۳۲/۳۷	۸/۶۹	۹۱/۸۷	۷۰/۲۳	۷۰۲/۲۷	۵/۴۹

جدول ۵ مشخصات میراگرهای جرمی تنظیم شونده

موقعیت قرارگیری میراگر جرمی تنظیم شونده	نسبت جرمی (%) $\mu = \frac{m_d}{M_s}$	جرم میراگر $m_d(kg)$	سختی کل $k_d(\frac{kgf}{m})$	میرایی کل $c_d(\frac{kg.Sec}{m})$
طبقه ۹ (طبقه بام)	۲	۱۴۲۶۸/۷۳	۸۱۳۴۱/۴۹۵۳۳	۲۰۴۴۰/۸۹۶۴۱
	۳	۲۱۴۰۳/۰۹	۱۲۲۰۱۲/۲۴۳	۳۰۶۶۱/۳۴۴۶۲
	۴	۲۸۵۳۷/۴۵	۱۶۲۶۸۲/۹۹۰۷	۴۰۸۸۱/۷۹۲۸۲
	۵	۳۵۶۷۱/۸۲	۲۰۳۳۵۳/۷۳۸۳	۵۱۱۰۲/۲۴۱۰۳
	۷	۴۹۹۴۰/۵۴	۲۸۴۶۹۵/۲۳۳۷	۷۱۵۴۳/۱۳۷۴۴



شکل ۹ نمودارهای هیستریزس جداساز با نسبت‌های متفاوت جرمی TMD



شکل ۱۰ مقدار تغییر مکان جانبی، نیرو و انرژی تلف شده در یک چرخه سامانه جداساز در سطح MCE به ازای نسبت‌های متفاوت جرمی TMD

شده در سطح جداساز و همچنین افزایش انرژی تلف شده، به ترتیب به میزان ۳۱، ۲۵ و ۱۶ درصد می‌شود که این سه مورد از عوامل مطلوب بر روی رفتار هیستریزس جداساز است.

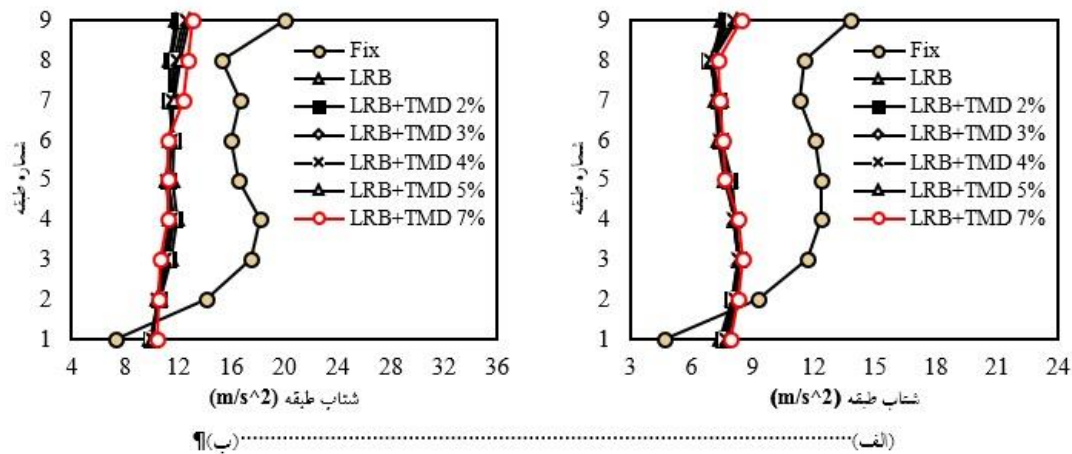
شتاب طبقات در سازه مجهز به سامانه جداساز لرزه‌ای همراه با میراگر جرمی. در این بخش به تشریح نمودارهای شتاب طبقات در سازه کنترل نشده و سازه کنترل شده با سامانه جداساز همراه با میراگر جرمی تنظیم شونده با نسبت‌های جرمی مختلف پرداخته شده است. همان طور که در نمودار شکل (۱۱) مشهود است، استفاده از سامانه میراگر جرمی تنظیم شونده همراه با سامانه جداساز، نه تنها به بهبود پاسخ شتاب سازه کنترل شده کمک نمی‌کند، بلکه با افزایش نسبت جرمی میراگر جرمی، پاسخ بیشینه شتاب طبقه در تراز بام نسبت به حالت جداساز LRB تنها افزایش مشاهده می‌شود. همان طور که در شکل (۱۳ و ۱۲) مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت جرمی میراگر میزان عملکرد سازه کنترل شده نسبت به حالت جداساز تنها در سطح زلزله طرح (DBE) و سطح بیشینه زلزله محتمل (MCE) به میزان ۰.۷٪ از ظرفیت سامانه کنترلی در بهبود پاسخ شتاب طبقات کاسته می‌شود.

نتایج تحلیل مدل‌ها

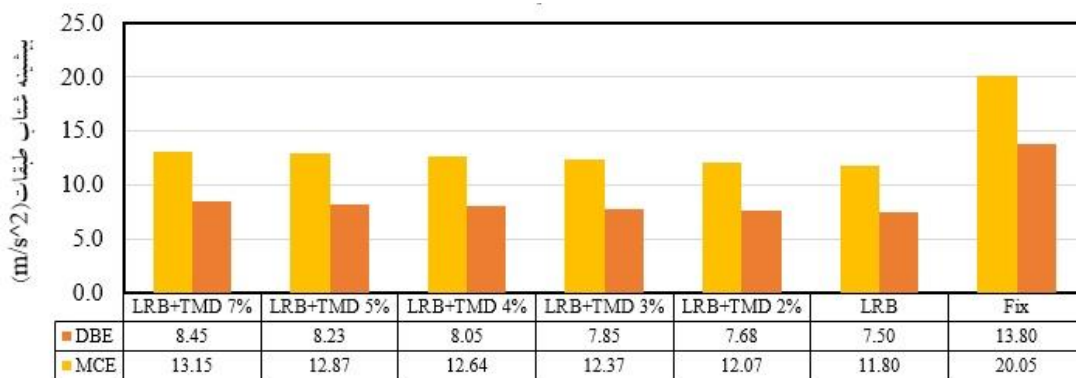
تأثیر نسبت‌های متفاوت جرمی TMD بر رفتار هیستریزس جداساز. در این قسمت به چگونگی تأثیر سطوح مختلف نسبت جرمی میراگر جرمی تنظیم شونده بر روی رفتار هیستریزس سامانه جداساز پرداخته می‌شود. عملکرد سامانه‌های جداساز از نظر رفتار هیستریزس با سه پارامتر یا سه مؤلفه مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرند که عبارتند از:

- ۱- مساحت زیر نمودار حلقه هیستریزس یا انرژی تلف شده؛
- ۲- بیشینه جابه‌جایی ایجاد شده در سطح جداساز؛
- ۳- بیشینه نیروی ایجاد شده در سطح جداساز.

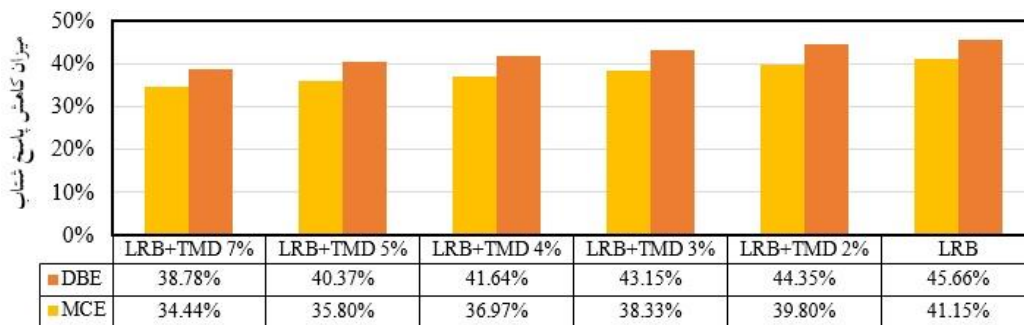
تمامی مقادیر مربوط به سه مؤلفه ذکر شده به منظور مقایسه و ارزیابی بهتر در شکل‌های (۹ و ۱۰) خلاصه شده است. لازم به ذکر است از آنجایی که کارایی جداساز در شدت‌های بالا بهتر مشخص می‌شود، در این بخش تنها در سطح MCE به بررسی مؤلفه‌های ذکر شده پرداخته شده است. همان طور که در شکل‌های (۹ و ۱۰) ملاحظه می‌شود، با افزایش نسبت جرمی سامانه میراگر جرمی تنظیم شونده تا ۷ درصد، باعث کاهش مقادیر بیشینه جابه‌جایی و نیروی ایجاد



شکل ۱۱ مقایسه شتاب طبقات سازه جداسازی شده با نسبت‌های جرمی مختلف میراگر جرمی: (الف) در زلزله سطح DBE، (ب) زلزله سطح MCE



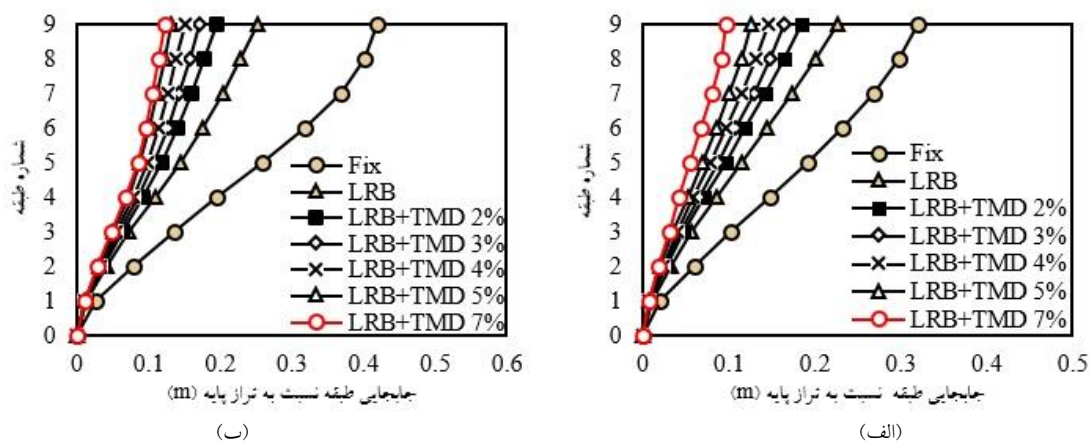
شکل ۱۲ مقایسه شتاب بیشینه طبقات سازه جداسازی شده با میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف



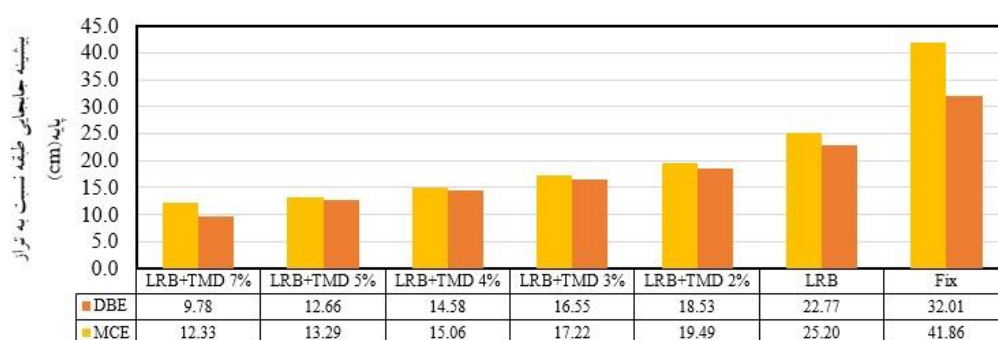
شکل ۱۳ درصد کاهش پاسخ شتاب بیشینه طبقات در سازه جداسازی شده با میراگرهای جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف

کنترل شده کمک می‌کند، که این بهبود پاسخ در جابه‌جایی نسبت به تراز پایه با افزایش نسبت جرمی میراگر جرمی تأثیر بیشتری در کاهش پاسخ می‌گذارد. همان‌طور که در شکل‌های (۱۵ و ۱۶) مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت جرمی میراگر میزان عملکرد سازه کنترل شده نسبت به حالت جداساز تنها در سطح زلزله طرح (DBE) و سطح بیشینه زلزله محتمل (MCE) به ترتیب به میزان ۴۱٪ و ۳۱٪ به ظرفیت سامانه کنترلی در بهبود پاسخ بیشینه جابه‌جایی طبقات (طبقه بام) نسبت به تراز پایه افزوده می‌شود.

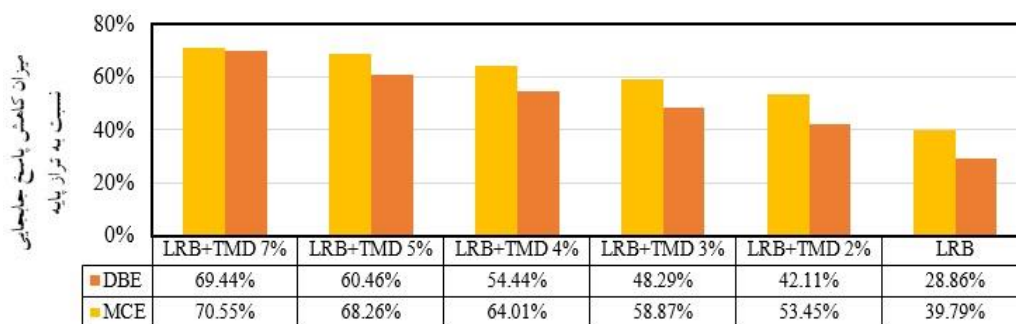
جابه‌جایی طبقات در سازه مجهز به سامانه جداساز لرزه‌ای همراه با میراگر جرمی. در این بخش به مقایسه پاسخ جابه‌جایی طبقات نسبت به تراز پایه در حالت بدون سامانه جداساز با حالت مجهز به سامانه جداساز و حالت مجهز به سامانه جداساز همراه با میراگر جرمی تنظیم شونده با نسبت‌های جرمی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان‌طور که در نمودار شکل (۱۴) مشهود است، استفاده از سامانه میراگر جرمی تنظیم شونده همراه با سامانه جداساز در تمامی حالت‌ها به بهبود پاسخ جابه‌جایی طبقات نسبت به تراز پایه در سازه



شکل ۱۴ مقایسه جابه‌جایی طبقات سازه جداسازی شده با نسبت‌های جرمی مختلف میراگر جرمی: (الف) در زلزله سطح DBE، (ب) زلزله سطح MCE



شکل ۱۵ مقایسه جابه‌جایی بیشینه طبقات نسبت به تراز پایه سازه جداسازی شده با میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف



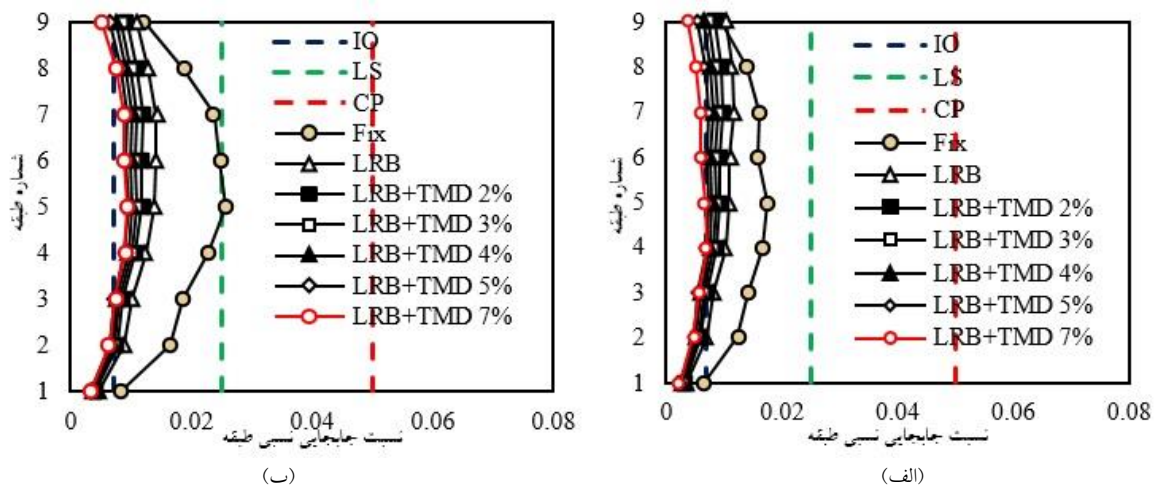
شکل ۱۶ درصد کاهش پاسخ جابه‌جایی بیشینه نسبت به تراز پایه در سازه جداسازی شده با میراگرهای جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف

خودش نشان دهد و این موضوع باعث کاهش جابه‌جایی نسبی طبقات می‌گردد. با توجه به شکل (۱۷) تغییر مکان جانبی نسبی در حالت کنترل نشده در طبقه پنجم در سطح زلزله طرح (DBE) و سطح بیشینه زلزله محتمل (MCE) به ترتیب از حد عملکردی سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه (IO/Immediate Occupancy) و سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) (Life Safety) تجاوز می‌کند؛ ولی بعد از تجهیز به سامانه کنترلی جداساز لاستیکی هسته سربی تنها و جداساز لاستیکی با میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف بهبود عملکرد در هر

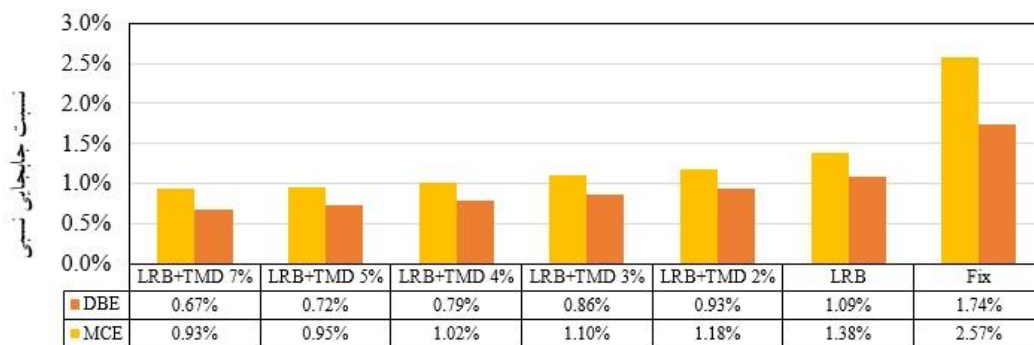
نسبت جابه‌جایی نسبی طبقات در سازه مجهز به سامانه جداساز لرزه‌ای همراه با میراگر جرمی. در این بخش به مقایسه پاسخ نسبت جابه‌جایی نسبی طبقات در حالت بدون سامانه جداساز با حالت مجهز به سامانه جداساز و حالت مجهز به سامانه جداساز همراه با میراگر جرمی تنظیم شونده با نسبت‌های جرمی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. جابه‌جایی نسبی طبقات در سازه‌های ایزوله شده به علت وجود جداسازها نسبت به سازه‌های پایه ثابت کمتر می‌باشد. وجود جداسازها در سازه باعث می‌شود روسازه در برابر زلزله رفتار صلبی از

مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت جرمی میراگر میزان عملکرد سازه کنترل شده نسبت به حالت جداساز تنها در سطح زلزله طرح (DBE) و سطح بیشینه زلزله محتمل (MCE) به ترتیب به میزان ۲۴٪ و ۱۸٪ به ظرفیت سامانه کنترلی در بهبود پاسخ بیشینه نسبت جابه‌جایی نسبی (دریفت) افزوده می‌شود که این امر در اقتصادی شدن ابعاد اعضای سازه‌ای مؤثر می‌باشد.

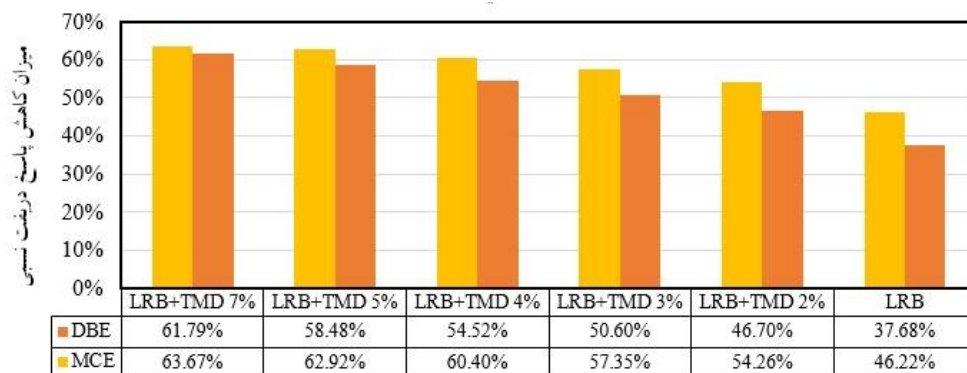
دو سطح زلزله طرح (DBE) و سطح بیشینه زلزله محتمل (MCE) مشاهده می‌شود، به طوری که استفاده از سامانه میراگر جرمی تنظیم شونده همراه با سامانه جداساز در تمامی حالت‌ها به بهبود پاسخ نسبت جابه‌جایی نسبی در سازه کنترل شده کمک می‌کند که این بهبود پاسخ و بهبود سطح عملکرد لرزه‌ای در نسبت جابه‌جایی نسبی با افزایش نسبت جرمی میراگر جرمی تأثیر بیشتری می‌گذارد. همان طور که در شکل‌های (۱۸ و ۱۹)



شکل ۱۷ مقایسه دریفت نسبی طبقات سازه جداسازی شده با نسبت‌های جرمی مختلف میراگر جرمی: (الف) در زلزله سطح DBE، (ب) زلزله سطح MCE



شکل ۱۸ مقایسه نسبت جابه‌جایی نسبی طبقات سازه جداسازی شده با نسبت‌های جرمی مختلف

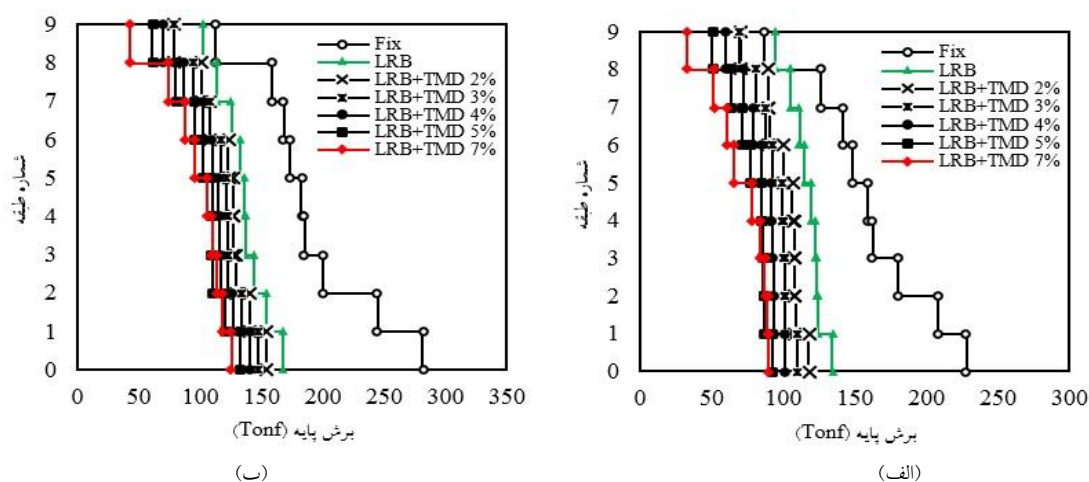


شکل ۱۹ درصد کاهش پاسخ نسبت جابه‌جایی نسبی بیشینه در سازه جداسازی شده با میراگرهای جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف

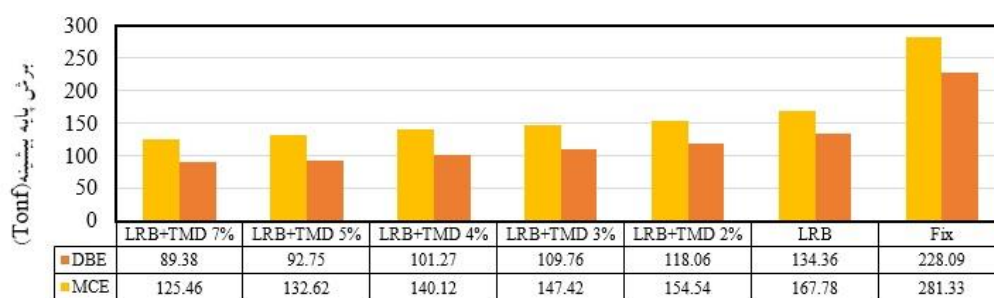
سامانه کنترلی جداساز همراه با میراگر جرمی تنظیم شونده در بهبود پاسخ برش پایه طبقات افزایش می‌یابد.

همان طور که در شکل‌های (۲۱ و ۲۲) مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت جرمی میراگر میزان عملکرد سازه کنترل شده نسبت به حالت جداساز تنها در سطح زلزله طرح (DBE) و سطح بیشینه زلزله محتمل (MCE) به ترتیب به میزان ۲۰٪ و ۱۵٪ ظرفیت سامانه کنترلی در بهبود پاسخ بیشینه برش پایه طبقات افزوده می‌شود که این امر در اقتصادتر نمودن طرح مؤثر می‌باشد.

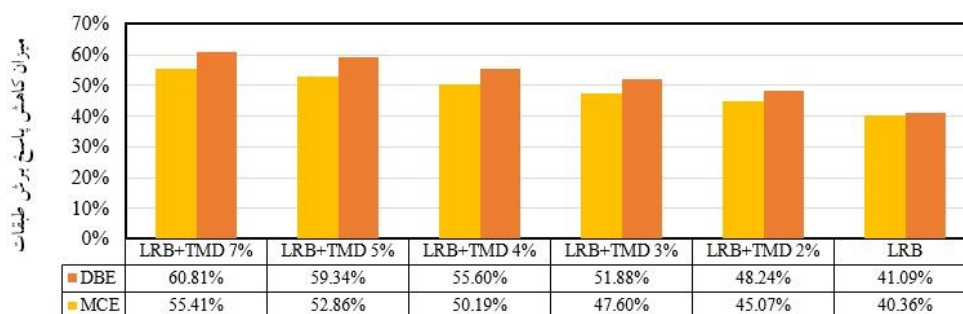
برش پایه طبقات در سازه مجهز به سامانه جداساز لرزه‌ای همراه با میراگر جرمی. در این بخش به مقایسه پاسخ نسبت برش پایه طبقات در حالت بدون سامانه جداساز با حالت مجهز به سامانه جداساز و حالت مجهز به سامانه جداساز همراه با میراگر جرمی تنظیم شونده با نسبت‌های جرمی مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان طور که در شکل (۲۰) مشاهده می‌شود، برش پایه طبقات در سازه ایزوله شده به علت وجود جداسازها نسبت به سازه‌های پایه ثابت کمتر می‌باشد و استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده باعث کاهش بیشتر در پاسخ برش پایه طبقات می‌گردد که با افزایش نسبت جرمی میراگر عملکرد



شکل ۲۰ مقایسه برش پایه طبقات سازه جداسازی شده با میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف: الف) در زلزله سطح DBE، ب) زلزله سطح MCE



شکل ۲۱ مقایسه برش پایه طبقات سازه جداسازی شده با میراگر جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف



شکل ۲۲ درصد کاهش پاسخ برش پایه بیشینه در سازه جداسازی شده با میراگرهای جرمی با نسبت‌های جرمی مختلف

نتیجه گیری

افزایش جابه جایی تراز جداسازی شده در سازه هایی که دوره تناوب آنها بیشتر می باشد، برخورد سازه های جداسازی شده را به سازه های کناری محتمل می کند، بنابراین برای رفع این اثر، طبق نتایج به دست آمده، استفاده از میراگر جرمی در تراز بام مطلوب می باشد. با توجه به خروجی تحلیل روش زمان دوام و مقایسه نتایج تحلیل، سامانه ترکیبی میراگر جرمی تنظیم شونده و جداساز پایه می تواند اثرات نامطلوب جابه جایی زیاد در تراز جداسازی شده را کاهش داده و در مجموع با کاهش نیاز (Demand) سازه و افزایش ظرفیت آن، در مقابل حرکت های زمین عملکرد مطلوبی داشته باشد که با افزایش نسبت جرمی میراگر این اثر بیشتر می گردد. در ادامه نتایج این مطالعه بر روی قاب فولادی نه طبقه مجهز به سامانه جداساز لرزه ای و میراگر جرمی تنظیم شونده به صورت خلاصه آورده می شود:

۱. استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده همراه با سامانه جداساز لرزه ای در کاهش پاسخ شتاب طبقات سازه نه تنها مؤثر نیست؛ بلکه با افزایش نسبت جرمی میراگر جرمی از

- کارایی سامانه کتتری در بهبود پاسخ شتاب نسبت به حالت جداساز تنها کاسته می شود.
۲. استفاده از میراگر جرمی تنظیم شونده باعث کاهش در پاسخ جابه جایی طبقات، برش پایه طبقات و نسبت جابه جایی نسبی سازه ایزوله شده می گردد که با افزایش نسبت جرمی میراگر این اثر بیشتر می گردد.
۳. استفاده از میراگرهای جرمی تنظیم شونده، باعث کاهش تقاضای شکل پذیری روسازه و سامانه جداساز می شود.
۴. افزایش نسبت جرمی میراگر جرمی تنظیم شونده باعث کاهش بیشینه جابه جایی و نیروی ایجاد شده در سطح جداساز و همچنین افزایش انرژی تلف شده توسط سامانه جداساز لرزه ای می شود که هر سه مورد جزو عوامل مطلوب در بهبود عملکرد لرزه ای و رفتار هیستریزیس سامانه جداساز می باشد.

سپاسگزاری

مراجع

1. C. Alhan and F. Şahin, "Protecting vibration-sensitive contents: An investigation of floor accelerations in seismically isolated buildings," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 9, no. 4, pp. 1203–1226, 2011, doi: 10.1007/s10518-010-9236-0.
2. L. Wang, W. Shi, and Y. Zhou, "Adaptive-passive tuned mass damper for structural aseismic protection including soil-structure interaction," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 158, p. 107298, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.soildyn.2022.107298.
3. X. Su, H. Kang, and T. Guo, "Modelling and energy transfer in the coupled nonlinear response of a 1:1 internally resonant cable system with a tuned mass damper," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 162, p. 108058, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.ymssp.2021.108058.
4. H. Frahm, *Device for damping vibrations of bodies*. US Patent 089958: US Patent 089958, 1909.
5. J. Ormondroyd, "The theory of the dynamic vibration absorber," *Trans., ASME, Appl. Mech.*, vol. 50, pp. 9–22, 1928.
6. J. P. Den Hartog, *Mechanical Vibrations*, 4th editio. McGraw-Hill, NY, 1956.
7. M. Argenziano, D. Faiella, A. R. Carotenuto, E. Mele, and M. Fraldi, "Generalization of the Den Hartog model and rule-of-thumb formulas for optimal tuned mass dampers," *J. Sound Vib.*, vol. 538, p. 117213, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jsv.2022.117213.
8. G. B. Warburton, "Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters,"

- Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 10, no. 3, pp. 381–401, 1982, doi: 10.1002/eqe.4290100304.
9. H. -C Tsai and G. -C Lin, "Optimum tuned-mass dampers for minimizing steady-state response of support-excited and damped systems," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 22, no. 11, pp. 957–973, 1993, doi: 10.1002/eqe.4290221104.
 10. C. C. Chang, "Mass dampers and their optimal designs for building vibration control," *Eng. Struct.*, vol. 21, no. 5, pp. 454–463, 1999, doi: 10.1016/S0141-0296(97)00213-7.
 11. A. M. Kaynia, D. Veneziano, and J. M. Biggs, "Seismic Effectiveness of Tuned Mass Dampers," *J. Struct. Div.*, vol. 107, no. 8, pp. 1465–1484, Aug. 1981, doi: 10.1061/JSDEAG.0005760.
 12. Y. P. Gupta and A. R. Chandrasekharan, "Absorber System for Earthquake Excitations," *Proceedings of the fourth world conference on earthquake engineering*, pp. B3-139, 1969.
 13. R. Villaverde, "Seismic control of structures with damped resonant appendages," *Proc. First World Conf. Struct. Control*, vol. 1, pp. 113–122, 1994.
 14. T. Pinkaew, P. Lukkunaprasit, and P. Chatupote, "Seismic effectiveness of tuned mass dampers for damage reduction of structures," *Eng. Struct.*, vol. 25, no. 1, pp. 39–46, Jan. 2003, doi: 10.1016/S0141-0296(02)00115-3.
 15. F. Nateghi, "The Effect of Tuned Mass Damper on Seismic Response of Building Frames with Uncertain Structural Characteristics," *Int. J. Eng.*, vol. 28, no. 5, pp. 662–670, 2015, [Online]. Available: https://www.ije.ir/article_72503.html
 16. A. Batou and S. Adhikari, "Optimal parameters of viscoelastic tuned-mass dampers," *J. Sound Vib.*, vol. 445, pp. 17–28, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.jsv.2019.01.010.
 17. J. van Til, F. Alijani, S. N. Voormeeren, and W. Lacarbonara, "Frequency domain modeling of nonlinear end stop behavior in Tuned Mass Damper systems under single- and multi-harmonic excitations," *J. Sound Vib.*, vol. 438, pp. 139–152, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jsv.2018.09.015.
 18. M. H. Stanikzai, S. Elias, V. A. Matsagar, and A. K. Jain, "Seismic response control of base-isolated buildings using tuned mass damper," *Aust. J. Struct. Eng.*, vol. 21, no. 1, pp. 310–321, Jan. 2020, doi: 10.1080/13287982.2019.1635307.
 19. L. Wang, S. Nagarajaiah, W. Shi, and Y. Zhou, "Seismic performance improvement of base-isolated structures using a semi-active tuned mass damper," *Eng. Struct.*, vol. 271, p. 114963, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.114963.
 20. F. Yang, R. Sedaghati, and E. Esmailzadeh, "Vibration suppression of structures using tuned mass damper technology: A state-of-the-art review," *J. Vib. Control*, vol. 28, no. 7–8, pp. 812–836, Apr. 2022, doi: 10.1177/1077546320984305.
 21. D. H. Yang, J. H. Shin, H. W. Lee, S. K. Kim, and M. K. Kwak, "Active vibration control of structure by Active Mass Damper and Multi-Modal Negative Acceleration Feedback control algorithm," *J. Sound Vib.*, vol. 392, pp. 18–30, 2017, doi: 10.1016/j.jsv.2016.12.036.
 22. Y. Nakamura and K. Okada, "Review on seismic isolation and response control methods of buildings in Japan," *Geoenvironmental Disasters*, vol. 6, no. 1, 2019, doi: 10.1186/s40677-019-0123-y.
 23. G. P. Warn and K. L. Ryan, "A Review of Seismic Isolation for Buildings: Historical Development and Research

- Needs,” *Buildings*, vol. 2, no. 3, pp. 300–325, Aug. 2012, doi: 10.3390/buildings2030300.
24. Federal Emergency Management Agency (FEMA), “*Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356)*.” Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency, 2000.
25. H. E. Estekanchi, A. Vafai, and M. Sadeghazar, “Endurance time method for seismic analysis and design of structures,” *Sci. Iran.*, vol. 11, no. 4, pp. 361–370, 2004.
26. H. E. Estekanchi, M. Mashayekhi, H. Vafai, G. Ahmadi, S. A. Mirfarhadi, and M. Harati, “A state-of-knowledge review on the endurance time method,” *Structures*, vol. 27, pp. 2288–2299, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.07.062.
27. H. E. Estekanchi, “Endurance Time Method Website,” 2020.
28. FEMA-440, “Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures,” *FEMA 440, Fed. Emerg. Manag. Agency*.
29. Y. M. Wu and B. Samali, “Shake table testing of a base isolated model,” *Eng. Struct.*, vol. 24, no. 9, pp. 1203–1215, Sep. 2002, doi: 10.1016/S0141-0296(02)00054-8.
30. Standard No.2800, *Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings*, 4th edition ed. Tehran, Iran.: Building and Housing Research Centre, 2015.
31. AISC Committee, *Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-16)*. Chicago-Illinois: American Institute of Steel Construction, 2016.
32. R. L. Mayes, “Design of Structures with Seismic Isolation,” in *The Seismic Design Handbook*, F. Naeim, Ed., 2nd ed. Boston, MA: Springer US, pp. 723–755, 2001. doi: 10.1007/978-1-4615-1693-4.
33. S.Y. Kim and C.-H. Lee, “Optimum design of linear multiple tuned mass dampers subjected to white-noise base acceleration considering practical configurations,” *Eng. Struct.*, vol. 171, no. June, pp. 516–528, 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.06.002.



Modeling and Analyzing the Accidents Severity due to the Lack of Attention to the Front in Covid-19 Restrictions using Logistic Regression

Research Article

Maziar Abolfazlzadeh¹, Seyed Ebrahim Abdolmanafi² , Hassan Khaksar³

DOI: [10.22067/jfcej.2023.81395.1217](https://doi.org/10.22067/jfcej.2023.81395.1217)

1. Introduction

This study discusses the identification and prevention of factors that contribute to accidents. Analyzing these factors is crucial for reducing and managing accidents, particularly in the case of multifactorial causes like traffic accidents. The priority should be identifying the main causes of accidents. The Covid-19 pandemic in Iran led to the implementation of new driving laws and regulations, potentially impacting traffic behaviors. While some areas experienced a decrease in driving activities due to restrictions, others saw an increase in accidents due to drivers' additional concerns and stress. Inattentiveness to the front was analyzed as a collision approach during the pandemic, along with other common accident causes. In 2020, 15,396 deaths were because of traffic accidents and some provinces had higher fatality rates. In 2021, 16,778 deaths and 317,120 injuries were reported. This study focused Rasht city. The study on traffic accidents in Rasht city revealed an increase in accidents during the Covid-19 traffic restrictions compared to the previous periods. Inattentiveness to the front was identified as a common cause. The study aimed to assess the impact of traffic restrictions, psychological burdens, and user behaviors on this factor. Other contributing factors to urban accidents were also examined.

2. Literature review

Several studies have investigated the impact of Covid-19 on road accidents. In a study focusing on New York City in 2022 showed that while the overall number of road accidents decreased during the stay-at-home policy, the severity of accidents and the number of casualties among cyclists increased significantly. Another study examined the effects of quarantine measures in Tarragona, Spain, and found a substantial reduction in accidents during the quarantine period, indicating the positive impact of reduced traffic on road safety. A paper in 2022 reviewed the influence of Covid-19 on road traffic safety and travel behavior, revealing that the pandemic led to fewer accidents but more severe ones. Other studies in 2003 and

2005 focused on modeling road accidents in urban areas and identified various factors related to traffic flow, road conditions, driver characteristics, and vehicle types that influence accident occurrence. Another study in 2022 found a significant decrease in fatalities and severe injuries during the Covid-19 pandemic in Bangladesh, suggesting the effectiveness of quarantine measures in reducing road accidents.

3. Method

For conducting this research, accident data recorded by the Traffic Police was utilized. The data encompassed the period from the beginning of Covid-19 related traffic restrictions in both urban and suburban areas, starting from March 2020, until the end of the restrictions in October 2021. The collected accident data included data on the accident location, street name, and timestamp (year, month, day, and hour). It also consisted of the elements involved in the accidents, such as humans, vehicles, animals, roadside objects, and so on. Environmental conditions, including weather, lighting, and road surface conditions, were documented as well. The causes of accidents were analyzed, covering factors such as the user's route, the type of accident, and the specific errors involved. In this study, a logistic regression model was used to model urban accidents in Rasht using SPSS software. The dependent variable was the severity of accidents, categorized into damage, injury, and fatality. Fatal accidents were combined with injury accidents. The independent variables included various parameters that affect accidents. To use logistic regression, the data were transformed into binary variables, with 1 indicating involvement in the accident and 0 indicating non-involvement. The majority of accidents (84%) were in the damage category, while 16% resulted in injury or fatality. The modeling aimed to analyze the relationship between the independent variables and the likelihood of different accident severities.

*Manuscript received, March 2, 2023. Revised, November April 9, 2023, Accepted, June 24, 2023.

¹ Corresponding author: MSc Student in Transportation Engineering, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran
Email: mz.abolfazlzadeh@gmail.com

² Assistant Professor, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran.

³ Assistant Professor, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, North Tehran Branch Tehran, Iran.

4. Modeling and analysis of results

Logistic regression modeling techniques, specifically backward, forward, and stepwise methods, were used to model accidents caused by inattention to the front. These techniques automate the selection of predictor variables for logistic regression models. The backward method starts with all predictor variables and eliminates the least important ones, while the forward method starts with one predictor variable and adds variables one by one. The stepwise method combines both approaches. After analyzing the results, it was found that the backward method yielded the highest predictive results and accuracy. After 18 steps of variable elimination, the final model was obtained. Variables with a significance level below 0.05 were considered highly reliable in predicting the output variables of the 18th step and the final model. Figure 1 shows the accident frequency and Table 1 shows the coefficients of the forward method model.

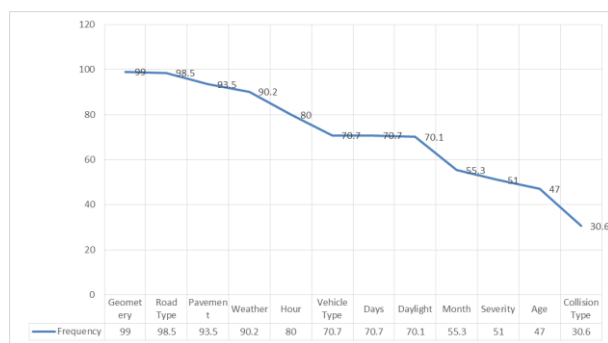


Figure 1. Accident frequency

Table 1. Coefficients of the forward method model

Sig.	df	P-Value	Final Step	Step 18
0.158	1	-2.353	Step	
0.000	70	21.742	Block	
0.000	70	21.742	Model	

Table 2 shows the variables included in the model, the results of the Wald test and the final logistic model. Certain variables, including day of the week (Thursday), age and gender of the driver (males over 60), time of day (9 pm to 6 am), collision type (front-to-front), and involvement of a Pride car, increase the likelihood of fatal or injury accidents. Conversely, variables such as time period between 6 am and 9 pm, dry road conditions, and daylight decrease the likelihood of fatal or injury accidents compared to property damage accidents. These findings offer insights for targeted interventions and prevention strategies. Wednesdays were identified as a significant factor contributing to the increased accidents in Rasht city during the Covid-19 period. The city's geographical features and its proximity to villages and other cities result in high traffic flow on Wednesdays, unaffected by the restrictions of the Covid-19. Accident rates decrease between 6 am and 9 pm but increase between 9 pm and 6 am due to nighttime travel restrictions. Factors such as inattentiveness, excessive speed, and the negative impact

of the Pride car model contribute to accidents during the Covid-19 pandemic. Pedestrians, especially the elderly, remain vulnerable, and the pandemic has not reduced their risk. Male drivers above 60 years old, driving Iranian-made vehicles, and engaging in front-to-front collisions have a significant impact on accident severity. Environmental factors like dry road surfaces and daylight visibility also play a role in reducing accidents.

Table 2. The variables of the logistic model of accident severity in Rasht city during the Covid-19 period

Exp(β)	(Sig.)	(Wald)	β	independent variable
0.217	0.109	2.570	1.529	Wednesday
0.035	0.012	6.364	-3.345	6 to 21 O'clock
0.087	0.002	9.205	2.446	21 to 6 O'clock
15.66	0.017	5.656	2.751	Drivers Above 60 yrs.
3.061	0.082	3.020	-1.119	Road Condition
0.127	0.008	6.946	2.063	Guilty Drivers
9.057	0.004	8.176	2.204	Front-to-front collision
0.013	0.002	9.323	-4.343	Daylight
3.532	0.029	4.743	1.162	Pride Car
840.32	0.021	5.338	6.734	Immobile thing

5. Conclusion

The study examined accident severity in Rasht city and found that factors like lack of attention, especially due to online communication while driving, contribute to accidents. Wednesday was identified as a day with increased accident frequency. Older male drivers and front-to-front collisions involving Pride vehicles were associated with a higher likelihood of fatal or injury accidents. On the other hand, daytime hours, dry road conditions, and good visibility were linked to a decreased probability of fatal or injury accidents.

6. Suggestions

The key measures to reduce accidents include:

- Compliance with traffic laws and regulations;
- Increasing public awareness of driving safety;
- Modifying driver behavior to prioritize safe driving practices;
- Improving driving infrastructure and road conditions;
- Utilizing advanced technology for enhanced safety measures;
- Enforcing traffic restrictions.



مدل سازی و تحلیل شدت تصادفات با علت تامه عدم توجه به جلو در دوران محدودیت های تردد کرونا با رگرسیون لجستیک*

مقاله پژوهشی

مازیار ابوالفضل زاده^(۱) سید ابراهیم عبدالمنافی^(۲) حسن خاکسار^(۳)

DOI: 10.22067/jfcee.2023.81395.1217

چکیده تصادفات رانندگی یکی از عوامل اصلی مرگ در جهان محسوب می شود. آمارهای تصادفات نشان می دهد که عدم توجه به جلو بیشترین علل تامه تصادفات می باشد. از زمان شیوع کووید-۱۹، سیاست های محدودیت سفر که به در شهرهای جهان اتخاذ شد، نقش عمیقی در تغییر الگوهای سفر ایفا کرد. یکی از عواملی که در سال های اخیر بر رفتار ترافیکی تأثیرگذار بود، همه گیری کرونا بود. از همین رو محدودیت هایی برای تردها وضع شد و رفتارهای ترافیکی متأثر بر آن بود. منع تردد سبب استفاده بیش از حد کاربران راه برای برقراری ارتباط به وسیله اپلیکیشن های ارتباطی در گوشی های همراه گشت. بررسی عدم توجه به جلو در کنار دیگر عوامل تأثیرگذار در شدت تصادفات، با استفاده از مدل های شدت تصادفات بر حسب پارامتر مؤثر در آن، امکان پذیر است. در این مقاله تصادفات درون شهری با علت تامه عدم توجه به جلو در طی دوران همه گیری کرونا با استفاده از رگرسیون لجستیک و اطلاعات مربوط به سال های ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۱ در سه بازه زمانی ۲۰ ماه قبل از شیوع کرونا، ۲۰ ماه حین همه گیری کرونا و ماه های اعلام پایان کرونا و برداشتن منع تردها مورد تحلیل قرار گرفت. مدل نهایی نشان می دهد که متغیرهای مستقل روز چهارشنبه، رانندگان مرد مقصر بالای ۶۰ سال، نحوه برخورد جلو به جلو و وسیله نقلیه مقصر پراید سبب افزایش احتمال وقوع تصادف فوتی یا جرحی نسبت به تصادف خسارتی می شوند. متغیرهایی با ضرایب منفی (ساعت ۶ تا ۲۱، شرایط سطح راه خشک، آب و هوای صاف و وضعیت روشنایی روز) سبب کاهش احتمال وقوع تصادف فوتی یا جرحی نسبت به تصادف خسارتی می شوند.

واژه های کلیدی شدت تصادفات، عدم توجه به جلو، کووید-۱۹، رگرسیون لجستیک.

Modeling and Analyzing the Accidents Severity due to the Lack of Attention to the Front in COVID-19 Restrictions using Logistic Regression

Maziar Abolfazlzadeh

Seyed Ebrahim Abdolmanafi

Hassan Khaksar

Abstract Traffic accidents are considered as one of the main causes of the worldwide death. Statistics indicate that the failure in keeping an eye on the road is the most common cause of accidents. Since the outbreak of COVID-19, policies executed extensively regarding travel restriction around the world have played a significant role in changing urban travel patterns. Relatedly, the global COVID-19 pandemic can be counted as one of the most influential factors in traffic behavior during recent years. As a result, since new driving regulations were established for urban and suburban traffic, therefore, traffic behaviors were affected by the aforesaid laws. In this regard, it is worth adding that travel prohibitions have led users to rely excessively on social applications to establish the missing communication. In this respect, alongside other influential factors in the severity of accidents, analyzing the failure in keeping an eye on the road through using accident severity models based on the effective parameter is possible. In this article, urban accidents that are related to the failure in keeping an eye on the road during the COVID-19 pandemic are analyzed by using logistic regression. Respectively, the data of this article covers the number of accidents from 2018 to 2022 in three intervals: 20 months before the spread of COVID-19, 20 months during the COVID-19 pandemic, and after eradication of urban traffic restrictions in Rasht city. The final model shows that the independent variables of Wednesday, male drivers over 60, bumper-to-bumper collision, and a specific car named Pride increase the probability of accident with fatal or light injuries compared to a property damage accident. Variables with negative coefficients (hours from 6 to 21, dry road surface conditions, clear weather, and daylight conditions) reduce the probability of accidents with fatal or light injuries compared to a property damage accident.

Keywords Accidents Severity, Covid-19, Logistic Regression, Failure in Keeping an Eye on the Road.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۱۲/۱۱ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۴/۳ می باشد.

Email: mz.abolfazlzadeh@gmail.com

(۱) نویسنده مسئول: دانشجوی کارشناسی ارشد حمل و نقل، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال.

(۲) استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال.

(۳) استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال.

مقدمه

شدند.

بازه زمانی بررسی تحقیق به وسیله دیتای تصادفات شهر رشت از ابتدای فروردین ۱۳۹۹ به عنوان شروع قوانین اعمال محدودیت های ترافیکی، تا ۳۰ آبان ۱۴۰۰، که پایان محدودیت ترافیکی اعلام شد، می باشد. بر اساس آمار تصادفات شهری رشت، مستخرج شده از اداره پلیس راهور شهر رشت، در بازه ۲۰ ماهه، از ابتدای اعمال محدودیت های تردد در اول فروردین سال ۱۳۹۹ تا ۳۰ آبان ماه ۱۴۰۰ که اعلام پایان محدودیت های تردد بود، تعداد ۴۵۲۳ تصادف وسیله نقلیه با وسیله نقلیه، در محدوده شهری رشت گزارش شده است. در حالی که در بازه ۲۰ ماه قبل از شیوع کرونا این تعداد، ۴۰۲۶ تصادف اعلام شده بود. این آمار نشان دهنده افزایش تصادف در دوران ممنوعیت تردد کرونایی در کشور بوده است. مطالعات بسیاری در دنیا انجام شده است که نشان می دهد عدم توجه به جلو یکی از شایعترین علل تامه تصادفات می باشد که مطالعه حاضر با استفاده از اطلاعات تصادفات، اقدام به مدل سازی لجستیک و بررسی و شناسایی پارامتر عدم توجه به جلو به عنوان عامل تأثیرگذار بر تصادفات جرحی و فوتی شده است تا تأثیر ممنوعیت تردها و بار روانی و رفتارهای کاربران راه در دوران همه گیری کرونا بر این پارامتر مورد تحلیل قرار گیرد. در ادامه سایر عوامل نیز مورد تحلیل قرار گرفت تا دیگر عوامل دخیل در تصادفات شهری مورد بررسی قرار گیرد.

پیشینه تحقیق

به دلیل نتایج و فواید قابل توجه مدل سازی تصادفات، تاکنون تلاش های بسیاری در زمینه ارائه مدل های پیش بینی تصادفات صورت گرفته اند. از آنجایی که مطالعه حاضر در خصوص تأثیر همه گیری کرونا بر تصادفات شهری می باشد، به مرور چند مطالعه اخیر انجام شده در این مورد نیز پرداخته می شود.

مطالعه اول توسط جیتای لی و همکارش [1]، با موضوع تأثیر سیاست های محدودیت سفر کوید-۱۹ بر الگوهای تصادفات جاده ای با تأکید بر دوچرخه سواران با مطالعه موردی شهر نیویورک، انجام پذیرفت. هدف این مطالعه ارائه نگرش ها و راهنمایی های سیاستی جدید در رابطه با تأثیر سیاست های محدودیت سفر مرتبط با کوید-۱۹ بر الگوهای تصادفات جاده ای، با تأکید بر ایمنی دوچرخه سواران بود. با تجزیه و

وقوع حوادث در دنیای امروز اجتناب ناپذیر است، اما عواملی که ممکن است باعث آن شوند، قابل شناسایی و پیشگیری هستند. این دلایل را می توان مورد تجزیه و تحلیل قرار داد و عملکردهای مفیدی را برای کاهش حوادث انجام داد. از آنجایی که تصادفات رانندگی یک دلیل چند عاملی است، شناسایی دلایل و بررسی دقیق وضعیت فعلی گامی اساسی در کاهش و کنترل حوادث است که بدون آن، برنامه ریزی و مدیریت آنها میسر نمی شود؛ بنابراین اولویت اصلی سازمان های ذی ربط باید شناسایی علل اصلی تصادفات باشد.

در پی بحران همه گیری بیماری کرونا در نقاط مختلف جهان، شیوع کرونا در ایران به صورت رسمی در ۳۰ بهمن ۱۳۹۸ تأیید شد. از اسفند ۱۳۹۸ وضعیت در ایران از سفید خارج و وارد وضعیت زرد شد. نیمه دوم اسفند ۱۳۹۸ طبق اعلام رسمی ویروس جدید کرونا تقریباً تمامی استان های کشور را در بر گرفته بود. از همین رو قوانین و مقررات جدید رانندگی برای تردهای شهری و برون شهری وضع شد و رفتارهای ترافیکی متأثر بر آن قوانین بود. ممکن است در دوران کرونا به دلیل محدودیت ها و مقررات جدیدی که برای کاهش شیوع بیماری اعمال شده است، فعالیت های رانندگی و ترافیک در برخی مناطق کاهش یابد. این می تواند به کاهش تعداد تصادفات شهری منجر شود. از طرف دیگر، ممکن است برخی رانندگان به دلیل نگرانی ها و استرس های اضافی ناشی از شرایط کرونا، عملکرد ضعیفتری در رانندگی داشته باشند که می تواند به افزایش تعداد تصادفات منجر شود. در راستای محدودیت های تردد، عامل عدم توجه به جلو به عنوان نحوه برخورد و وقوع تصادف در دوران همه گیری کرونا مورد تحلیل قرار گرفت تا میزان اثرات این عامل در کنار عوامل معمول تصادفات بررسی و مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند. در سال ۱۳۹۹ که از ابتدای آن سال محدودیت های ترافیکی وضع شده بود، تعداد ۱۵،۳۹۶ فوت ناشی از تصادف رانندگی در سازمان پزشکی قانونی به ثبت رسیده است. استان های فارس، تهران، اصفهان، کرمان، سیستان و بلوچستان، گیلان، مازندران، خراسان رضوی، آذربایجان شرقی و غربی بیشترین سهم کشته شدگان را در سال ۱۳۹۹ داشته اند. ۱۶ هزار و ۷۷۸ نفر در تصادفات سال ۱۴۰۰ جان خود را از دست دادند و ۳۱۷ هزار و ۱۲۰ نفر مصدوم

مشخص شد که بزرگی کوید-۱۹ منجر به تصادفات و جراحات کمتر و همچنین کاهش عملکرد ایمنی جاده‌ها، اما تصادفات جدیتر می‌شود. نتایج این مطالعه دارای پیامدهای قانونی قابل توجهی است و همچنین می‌تواند به راهنمایی چگونگی مدیریت قرنطینه بیشتر از نظر ایمنی ترافیک و رفتار سفر کمک کند.

برگ گل و کیومرثی [4]، با استفاده از داده‌های مربوط به تصادفات شهر رشت در سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ و همچنین استفاده از روش آماری تحلیل مسیر، پارامترهای مؤثر بر انواع برخوردهای صورت گرفته در تصادفات موتورسیکلت‌ها را مورد بررسی قرار دادند. آنها با تمرکز بر روی تأثیر عواملی همچون سن موتورسوار، زمان وقوع تصادف و شرایط محیطی و سطحی جاده به این نتیجه رسیدند که بیشترین نوع برخورد، برخورد پهلوی جلو و کمترین نوع برخورد، برخورد با شیء ثابت بود و متغیر وضعیت آب و هوا با ۰/۳۵۵ واحد بیشترین تأثیر و متغیر وضعیت روشنایی مسیر با تأثیر ناچیز ۰/۰۰۱ کمترین تأثیر را بر تنوع برخوردها داشت.

در مطالعه‌ای دیگر، برگ گل و صومعه‌سرای [5] به بررسی تأثیر هر یک از انواع خودروها بر شدت تصادفات پرداختند. آنها در این مطالعه خودروهای مقصر و غیرمقصر در تصادفات را به تفکیک وسایل نقلیه ساخت داخل، خارج از کشور، منطقه آزاد، تاکسی و وسایل نقلیه سنگین تفکیک و دسته‌بندی کردند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که در شهر رشت خودروی پراید هم به صورت مقصر و غیرمقصر در شدت تصادفات تأثیرگذار می‌باشند.

مدل‌های پیش‌بینی تصادفات برای مسیرهای شهری در مطالعه‌ای در سال ۲۰۰۳ توسط پل گریب برای بررسی تصادفات رخ داده در تقاطع‌ها و خیابان‌ها به صورت جداگانه انجام شد. متغیرهایی که توصیف‌کننده جریان ترافیک هستند به خصوص برای تقاطع‌ها تأثیرگذار و برای مدل‌های مربوط به مسیرها متغیرهایی چون تعداد خروجی‌ها، ورودی‌ها به مسیر، وضعیت پارکینگ و محدودیت سرعت در وقوع تصادف مؤثر شناخته شده‌اند [6].

یان و همکاران [7] تحقیقی با عنوان مشخصات تصادفات از نوع برخورد به عقب در تقاطع‌های زمانبندی شده با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک چندگانه مدل‌سازی تصادفاتی که از

تحلیل داده‌های تصادفات در شهر نیویورک و برآورد سه مدل لاجیت اثر ثابت بر روی وقوع انواع مختلف تصادفات در یک منطقه کذبندی شده و بازه زمانی معین، یافته‌های زیر را به دست آوردند: در حالی که تعداد کلی تصادفات جاده‌ای در نیویورک پس از اجرای سیاست ماندن در خانه به شدت کاهش یافت، میانگین شدت آن افزایش یافت. میانگین تعداد کشته یا مجروح شدن دوچرخه‌سواران در هر تصادف نسبت به سطوح مشابه در سال‌های گذشته بیش از سه برابر شده است. این مقاله به درک تأثیر سیاست‌های محدودیت سفر کوید-۱۹ بر تصادفات مربوط به دوچرخه‌سواران کمک می‌کند و خطرات بالاتری را برای دوچرخه‌سواران به‌عنوان پیامد ناخواسته سیاست‌های محدودیت سفر نشان می‌دهد و ابزاری تحلیلی برای ارزیابی تأثیر ایمنی جاده‌ها در صورت در نظر گرفتن محدودیت‌های سفر در آینده ارائه می‌کند.

در مطالعه بعدی اسکار سالادی و همکارانش [2]، تأثیر قرنطینه کوید-۱۹ بر کاهش تصادفات در استان تاراگونا در کشور اسپانیا را مورد بررسی قرار دادند. این مقاله تأثیری را که قرنطینه‌ای که توسط دولت اسپانیا برای مبارزه با گسترش کوید-۱۹ بر تصادفات رانندگی در استان تاراگونا (اسپانیا) گذاشته است، تحلیل می‌کند. در طول دوره مورد مطالعه قرنطینه (۱۶ مارس تا ۲۶ آوریل ۲۰۲۰) تعداد تصادفات در روز ۷۴،۳ درصد در مقایسه با ۱۴-۲۰ فوریه (هفته مرجع) و ۷۶ درصد نسبت به دوره مشابه در ۲۰۱۸-۲۰۱۹، کاهش داشته است. این نشان‌دهنده تأثیر مثبت چند برابری کاهش ترافیک بر ایمنی جاده‌ها است. یافته‌های آنها شواهد جدیدی از تأثیر مخرب همه‌گیری کوید-۱۹ بر حمل و نقل و نحوه استفاده از آن به‌عنوان کاتالیزوری برای ارتقای سیستم‌های حمل و نقل پایدار و ایمنتر ارائه می‌دهد. این کاهش تصادفات بیشتر از کاهش تحرک در مدت مشابه (۶۲/۹ درصد) بوده است. این امر نشان‌دهنده تأثیر مثبت چند برابری کاهش ترافیک بر ایمنی جاده‌ها است.

در یک مطالعه دیگر ابراهیم شایک و همکارش [3]، مقاله‌ای با عنوان مروری بر تأثیر کوید-۱۹ بر ایمنی ترافیک جاده‌ای و رفتار سفر به چاپ رسانده‌اند. مطالعه حاضر تلاش کرد تا مروری بر تأثیر همه‌گیری کوید-۱۹ بر تصادفات ترافیکی، مرگ و میر و جراحات و همچنین رفتار سفر جاده‌ای ارائه دهد.

مشخصات راننده (جنس، نوع گواهینامه و کمربند ایمنی)، ویژگی های وسایل نقلیه (نوع وسیله نقلیه)، ویژگی های جاده (نوع سطح جاده، طبقه بندی جاده)، شرایط محیطی (روز و وقوع تصادف، زمان تصادف) و محلی سازی آسیب این نتیجه ممکن است به بهبود ایمنی ترافیک بنگلادش کمک کند [9].

با توجه به مطالعات پیشین که در این قسمت به تعدادی از آنها اشاره شد، بررسی عوامل مؤثر بر شدت تصادفات همواره قابل توجه پژوهشگران بوده است و مدل سازی با استفاده از رگرسیون لجستیک می تواند در این راستا مفید واقع شود.

روش تحقیق

مکان مورد مطالعه. مطالعه حاضر در شهر رشت انجام گرفته است. این شهر یکی از شهرهای ایران و مرکز استان گیلان است. این شهر بزرگترین و پرجمعیتترین شهر شمال ایران نیز محسوب می شود. بر اساس سرشماری رسمی در سال ۱۳۹۵ جمعیت آن ۶۷۹,۹۹۵ نفر بوده است و تراکم جمعیت شهر رشت ۴۳۴۰ نفر در هر کیلومتر مربع است. (در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و محدوده شهری رشت نشان داده شده است).

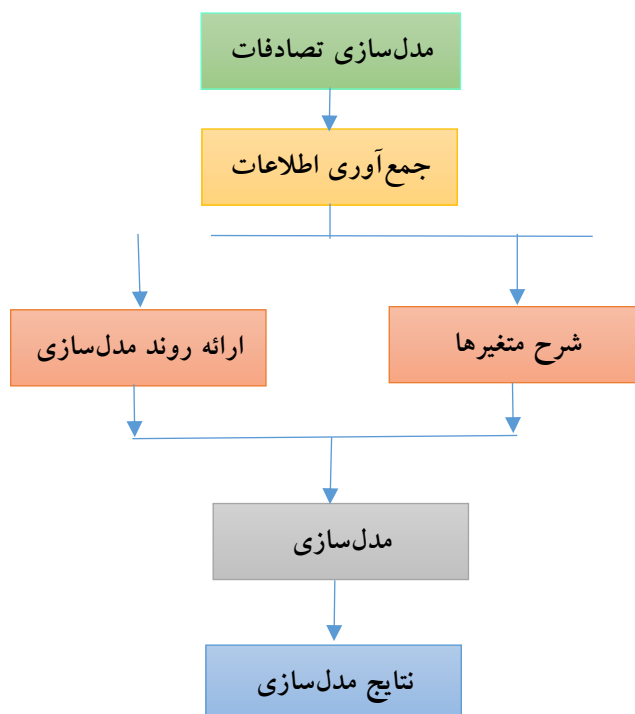
جمع آوری اطلاعات. به منظور انجام تحقیق و بررسی در زمینه بهبود سیستم ایمنی راه ها، اطلاعات تصادفات که موضوعاتی از قبیل زمان حادثه، مشخصات انسانی، مشخصات محیطی و مشخصات تصادف را شامل می شود، باید جمع آوری شوند. اطلاعات مورد استفاده از فرم های کام ۱۱۴ که توسط پلیس راهنمایی و رانندگی برای ثبت اطلاعات تصادفات مورد استفاده قرار می گیرند، در بازه دوران شروع کووید و اعمال محدودیت های تردد درون شهری و برون شهری که از ابتدای فروردین ۱۳۹۹ بود، تا پایان اعمال محدودیت ها که در آبان ۱۴۰۰ بود، مورد استفاده قرار گرفت. این اطلاعات تصادفات محل وقوع تصادف، نام خیابان، زمان وقوع تصادف شامل سال، ماه، روز، ساعت، عناصر دخیل در تصادف شامل انسان، وسیله نقلیه، حیوانات، اشیای کنار جاده و غیره، شرایط محیطی شامل آب و هوا، نور و شرایط سطح جاده، علت وقوع تصادف شامل مسیر کاربر راه، نوع تصادف و نوع خطاها را در بر می گیرد. شکل (۲) روند مدل سازی تصادفات و روند تحقیق را نشان داده است.

نوع برخورد به عقب در تقاطع های زمان بندی شده می باشد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که هفت فاکتور مربوط به محیط (مسیر) شامل تعداد خطوط، مجزا یا غیرمجزا بودن مسیرها، زمان تصادف، شرایط سطح مسیر، داخل یا حومه شهر بودن تصادف، محدودیت سرعت و پنج فاکتور مربوط به مقصر شامل نوع وسیله، سن راننده، مصرف کردن یا نکردن مشروبات الکلی، ملیت راننده و چهار فاکتور مربوط به وسیله مورد تصادف واقع شده شامل نوع وسیله، سن راننده، ملیت راننده از مهمترین فاکتورهای مؤثر در تصادفات شناسایی شده اند.

در مطالعه دیگر نجفی مقدم گیلانی و همکاران [8] به بررسی متغیرهای تأثیرگذار بر تصادفات شهر رشت پرداختند. در این مطالعه آنها تأثیر ۱۴ متغیر را بر شدت تصادفات معابر شهری مورد بررسی قرار دادند. علاوه بر این با استفاده از روش رگرسیون لجیت و الگوریتم های فراابتکاری به مدل سازی و پیش بینی شدت تصادفات پرداختند. نتایج مطالعات آنها با استفاده از تحلیل آزمون فیریدمن نشان داد که وضع روشنایی معابر، رده عملکردی معابر و وضع آب و هوا به ترتیب رتبه های اول و سوم تأثیرگذار بر تصادفات را شامل می شدند. از طرفی کاربری زمین دارای رتبه پنجم تأثیرگذار بر تصادفات بعد از نوع وسیله نقلیه می باشد. علاوه بر این نتایج مدل سازی ها نشان داد که با ۹۵ درصد اطمینان کاربری زمین و رده عملکردی معابر از جمله متغیرهای تأثیرگذار بر شدت تصادفات می باشند. حنیف بویان در مطالعه ای که در سال ۲۰۲۲ در بنگلادش انجام داد، به نتایج زیر رسید. در ابتدا بر اساس آمار نشان داده شد در این کشور روزانه بیش از ۸ نفر در تصادفات جاده ای جان خود را از دست می دهند. بر اساس سوابق رسمی تصادفات در سال ۲۰۱۶، ۳۴۱۲ نفر مجروح شدند و ۸۵۷۲ نفر دیگر در تصادفات جاده ای به شدت مجروح شدند. در سال بعد تعداد تلفات به ۴۲۸۴ کشته و ۹۱۱۲ جرحی شدید افزایش یافت. انجمن رفاه مسافران بنگلادش اعلام کرد که در بحبوحه قرنطینه ناشی از کووید-۱۹ در سال ۲۰۲۰ در بنگلادش ۶۶۸۶ نفر جان خود را از دست دادند و ۸۶۰۰ نفر نیز مجروح شدند که نشان می دهد تعداد تلفات به طرز قابل توجهی کاهش یافته است. در نتایج حاصل از درخت تصمیم می توان دید از ۱۴ ویژگی مستقل تعداد ۹ ویژگی به عنوان عوامل تأثیرگذار شناخته شدند. ویژگی های مهم مرتبط با شدت تصادفات شامل



شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و محدوده شهری رشت



شکل ۲ روند تحقیق مدل‌سازی تصادفات شهری

تصادفات منجر به خسارت و تصادفات منجر به جرح و فوت تقسیم بندی شد. نزدیک به ۸۴ درصد از نمونه های تصادفات، از نوع خسارتی و ۱۶ درصد تصادفات منجر به جرح یا فوت هستند. متغیرهای مستقل شامل انواع مختلف پارامترهای مؤثر در تصادفات می باشد. از طرفی به منظور استفاده از رگرسیون لجستیک در روند مدل سازی، داده ها باید به صورت متغیرهای دوتایی درآید. لذا کلیه متغیرها به این صورت که عدد ۱ نشانگر دخالت متغیر در تصادف مورد نظر و عدد صفر نشانگر عدم دخالت متغیر در تصادفات به صورت متغیرهای دوتایی تبدیل شده اند. در جدول (۱) شرح متغیرها به همراه درصد فراوانی هر یک آورده شده است.

مدل سازی و تحلیل نتایج

برای مدل سازی تصادفات با علت تامه عدم توجه به جلو، از روش های داخل شدن، پس رو (Backward) و پیش رو (Forward) مدل سازی لجستیک استفاده شد. رگرسیون لجستیک به پس رو و پیش رو تکنیک هایی هستند که برای خودکار سازی فرایند انتخاب متغیرهای پیش بینی کننده برای مدل های رگرسیون لجستیک استفاده می شوند. در رگرسیون لجستیک پس رو، مدل با همه متغیرهای پیش بینی کننده موجود شروع می شود و کم اهمیت ترین متغیر را یکی یکی حذف می کند تا زمانی که مرتبط ترین متغیرها شناسایی شوند. در رگرسیون لجستیک پیش رو، مدل با یک متغیر پیش بینی شروع می شود و متغیرها را یکی یکی اضافه می کند تا زمانی که هیچ متغیر اضافی مدل را بهبود نبخشد. این تکنیک ها همچنین می توانند در یک رگرسیون لجستیک گام به گام ترکیب شوند که بدون هیچ تغییری در مدل شروع می شود و متغیرها را اضافه و حذف می کند تا زمانی که بهبود بیشتری در مدل مشاهده نشود. بر همین اساس، پس از تحلیل، نتایج نهایی نشان داد که روش پس رو دارای بالاترین نتایج پیش بینی و درصد صحیح می باشد. از همین رو جدول (۲)، نتایج خروجی مدل بر اساس این روش را نشان می دهد. همان طور که از نتایج مشخص است، مدل نهایی پس از حذف متغیرهایی با درصد معناداری کمتر در مرحله ۱۸ به دست آمد. مقادیر معناداری کمتر از ۰/۰۵ نشان دهنده درصد بالای قابل اعتماد به متغیرهای خروجی مرحله ۱۸ و نهایی می باشد.

جدول (۳) متغیرهای وارد شده در مدل، نتایج آزمون والد (Wald) و مدل لجستیک نهایی را نشان می دهد.

شرح متغیرها و روند مدل سازی. رگرسیون لجستیک (Logistic regression) یک روش آماری است که برای تجزیه و تحلیل رابطه بین یک متغیر وابسته و یک یا چند متغیر مستقل استفاده می شود. در زمینه تجزیه و تحلیل تصادف، از رگرسیون لجستیک می توان برای تجزیه و تحلیل عواملی استفاده کرد که در احتمال وقوع حادثه نقش دارند.

در رگرسیون لجستیک، متغیر وابسته دو قطبی است (یعنی دو نتیجه ممکن دارد)، مانند اینکه آیا حادثه ای رخ داده است یا خیر. متغیرهای مستقل پیوسته یا مقوله ای هستند، مانند سن یا شرایط جاده. مدل رگرسیون لجستیک احتمال اینکه متغیر وابسته یک مقدار خاص باشد (مثلاً احتمال وقوع حادثه) را بر اساس مقادیر متغیرهای مستقل تخمین می زند.

مدل رگرسیون لجستیک یک معادله ریاضی است که یک نتیجه باینری (Binary) را پیش بینی می کند [10] (یعنی یک متغیر وابسته که می تواند تنها دو مقدار ممکن مانند «بله» یا «نه»، «موفقیت» یا «شکست» و غیره را تحلیل کند). شکل کلی معادله رگرسیون لجستیک به شرح رابطه (۱) است.

$$p = \frac{1}{1 + e^{-(b_0 + b_1x_1 + \dots + b_nx_n)}} \quad (1)$$

که در آن:

P : احتمال پیش بینی شده نتیجه باینری است،

b_0 : مقدار ثابت رگرسیون است،

$b_1, b_2, \dots, b_n$ ضرایب برای متغیرهای مستقل $x_1, x_2, \dots, x_n$ است.

ضرایب $b_1, b_2, \dots, b_n$ از داده ها با استفاده از یک روش تخمین حداکثر درست نمایی تخمین زده می شوند، که مقادیر ضرایبی را پیدا می کند که احتمال مشاهده داده های مدل را به حداکثر می رساند. سپس از ضرایب تخمین زده شده می توان برای پیش بینی احتمال نتیجه باینری برای مشاهدات جدید استفاده کرد.

به منظور مدل سازی تصادفات درون شهری رشت از مدل لجستیک ساده با استفاده از نرم افزار SPSS استفاده شد. برای شروع مدل سازی نیاز به دو دسته متغیر وابسته و متغیر یا متغیرهای مستقل می باشد. متغیر وابسته در این تحقیق سطوح مختلف شدت تصادف می باشد که به سه دسته خسارتی، جرحی و فوتی طبقه بندی شده است. تصادفات فوتی با تصادفات منجر به جرح ادغام گردید و متغیر وابسته به دو دسته

جدول ۱ شرح متغیرها به همراه فراوانی آنها در تصادفات

نوع متغیر	نام متغیر	درصد فراوانی	نوع متغیر	نام متغیر	درصد فراوانی
شدت تصادف	خسارتی	۴۹	نوع راه	اصلی	۹۸,۵
	جرحی و فوتی	۵۱		فرعی	۱,۵
ساعت تصادف	۶ - ۲۱	۸۰	شرایط سطح راه	خشک و معمولی	۹۳,۵
	۲۱-۶	۲۰		مرطوب و خیس	۶,۵
روز	پنجشنبه و جمعه	۲۹,۳		آب گرفتگی	-
	روزهای کاری	۷۰,۷		یخبندان	-
ماه	بهار	۴۴,۷	هندسه راه	شنی و خاکی	-
	تابستان	۵۵,۳		مستقیم و مسطح	۹۹
	پاییز	-		پیچ	۰,۸
	زمستان	-		تقاطع	۰,۲
نحوه برخورد	جلو به جلو	۲۳,۱	پل	پل	-
	جلو به پشت	۳۰,۶		دوربرگردان	-
	جلو به پهلو	۱۲,۶	وضع روشنایی	روز	۷۰,۱
	جلو به واژگونی	-		شب با نور کافی	۲۴,۱
	پشت به جلو	۳,۳		شب بدون نور کافی	۲,۲
	پشت به پشت	۱,۵		طلوع	۰,۲
	پشت به پهلو	۱,۲		غروب	۳,۵
	پشت - واژگونی	-	وضع هوا	صاف	۹۰,۲
	پهلو به جلو	۱۴,۳		ابری	۴,۵
	پهلو به پشت	۰,۶		بارانی و مه آلود	۵,۴
	پهلو به پهلو	۱۲,۸		برف	-
سن مقصرین	پهلو- واژگونی	-	نوع وسیه نقلیه مقصر و غیر مقصر	ایرانی	۷۰,۷
	زیر ۱۸ سال	۱,۲		چینی	۵,۵
	۱۸ - ۳۰	۲۲,۶		خارجی	۱۰,۲
	۳۱ - ۴۵	۴۷		سنگین	۶,۳
	۴۶ - ۶۰	۲۲,۷		موتورسیکلت	۱,۴
	بالای ۶۰	۶,۵		دوچرخه	-

جدول ۲ ضرایب مدل روش پیش رو

مرحله نهایی	کای دو	df	معناداری (Sig.)
مرحله ۱۸	Step	۱	۰/۱۵۸
	Block	۷۰	۰/۰۰۰
	Model	۷۰	۰/۰۰۰

جدول ۳ متغیرهای مدل لجستیک شدت تصادفات شهر رشت- در طی دوران کوید ۱۹

متغیرهای مستقل	β	آماره (wald)	معناداری (Sig.)	Exp(β)
چهارشنبه	۱/۵۲۹	۲/۵۷۰	۰/۱۰۹	۰/۲۱۷
ساعت ۶ الی ۲۱	-۳/۳۴۵	۶/۳۶۴	۰/۰۱۲	۰/۰۳۵
ساعت ۲۱ تا ۶	۲/۴۴۶	۹/۲۰۵	۰/۰۰۲	۰/۰۸۷
رانندگان بالای ۶۰ سال	۲/۷۵۱	۵/۶۵۶	۰/۰۱۷	۱۵/۶۶
شرایط سطح راه خشک	-۱/۱۱۹	۳/۰۲۰	۰/۰۸۲	۳/۰۶۱
راننده مرد مقصر	۲/۰۶۳	۶/۹۴۶	۰/۰۰۸	۰/۱۲۷
برخوردها به جلو	۲/۲۰۴	۸/۱۷۶	۰/۰۰۴	۹/۰۵۷
وضعیت روشنایی روز	-۴/۳۴۳	۹/۳۲۳	۰/۰۰۲	۰/۰۱۳
وسیله نقلیه مقصر پراید	۱/۲۶۲	۴/۷۴۳	۰/۰۲۹	۳/۵۳۲
شی ثابت	۶/۷۳۴	۵/۳۳۸	۰/۰۲۱	۸۴۰/۳۲

آزمون والد یک آزمون آماری است که در رگرسیون لجستیک برای تعیین اهمیت متغیرهای پیشین فردی در مدل استفاده می شود. انحراف پارامتر تخمین زده شده از مقدار فرضیه صفر آن را نسبت به خطای استاندارد پارامتر برآورد شده اندازه گیری می کند. از این آزمون برای ارزیابی اینکه آیا ضریب یک متغیر پیش بینی کننده به طور قابل توجهی با متغیر نتیجه مرتبط است یا خیر استفاده می شود. آزمون والد برای انتخاب متغیر و ساخت مدل مهم است، اما آزمون های دیگری نیز ممکن است برای تأیید اهمیت متغیر پیش بینی کننده استفاده شوند. این آزمون قابل مقایسه با آماره t در رگرسیون معمولی می باشد.

بر این اساس، ضرایب مثبت متغیرهای مستقل جدول (۳) بیانگر رابطه مثبت آنها با شدت تصادفات است. بدین مفهوم که متغیرهای مستقل روز چهارشنبه (روز کاری)، رانندگان مرد مقصر بالای ۶۰ سال، ساعت ۲۱ تا ۶ صبح، نحوه برخورد جلو به جلو و وسایل نقلیه مقصر پراید سبب افزایش احتمال وقوع تصادف فوتی یا جرحی نسبت به تصادف خسارتی می شوند. متغیرهایی با ضرایب منفی (ساعت ۶ تا ۲۱، شرایط سطح راه خشک و وضعیت روشنایی روز) سبب کاهش احتمال وقوع تصادف فوتی یا جرحی نسبت به تصادف خسارتی می شوند.

یکی از متغیرهای تأثیرگذار در افزایش تصادفات شهر رشت در طی دوران کوید، روز چهارشنبه می باشد. با توجه به ویژگی های جغرافیایی شهر رشت و نزدیکی روستاها و شهرهای مختلف به مرکز استان، این روز بیشترین جریان اوج ترافیک را تجربه می کند که حتی محدودیت های کرونا نیز در

تغییر این روز نسبت به شرایط قبلی کرونا نیز اثرگذار نبود. علاوه بر این نتایج نشان می دهد که ساعات ۶ صبح تا ۲۱ سبب کاهش تصادفات می شود در حالی که ساعت ۲۱ تا ۶ صبح سبب افزایش تصادفات می شود که این موضوع نشان دهنده این نکته می باشد که محدودیت سفر شبانه سبب افزایش تصادفات شهر رشت شده است. به عبارت دیگر ترکیبی از عواملی چون عدم توجه به جلو و سرعت غیرمجاز می تواند یکی از عوامل ایجاد تصادفات در اثر محدودیت های شبانه کرونا باشد. نکته قابل توجه و مشابه سایر مقالات، تأثیرگذاری خودروی پراید به عنوان یک عامل منفی می باشد که می تواند سبب افزایش تصادفات شهر رشت در طی دوران کوید-۱۹ شده باشد. عابران پیاده همواره یک از آسیب پذیرترین گروه های کاربر راه می باشند که همه گیری کرونا نیز باعث کاهش این نوع از تصادفات نشده است بلکه حتی گروه سنی مسن عابران پیاده را نیز تحت شعاع قرار داده است. از جنبه عامل انسانی، رانندگان مرد بالای ۶۰ سال، با وسیله نقلیه ساخت ایران (پراید)، با برخورد جلو به جلو، تأثیرگذارترین پارامترهای شدت تصادف به علت عدم توجه به جلو است. سطح راه خشک و روشنایی روز نیز، به عنوان عامل محیطی نقش به سزایی در کاهش تصادفات دارد.

نتیجه گیری

از جمله مدل های معمول در زمینه تصادفات، مدل سازی با استفاده از رگرسیون لجستیک است. در مطالعه حاضر با بررسی فراوانی و میزان تأثیرگذاری پارامتر عدم توجه به جلو و

داشته باشد. برای این منظور، با توجه به نتایج مطالعات چند پیشنهاد برای کاهش تصادفات درون شهری ارائه می‌شود:

۱. رعایت قوانین رانندگی و مقررات ترافیکی. رعایت قوانین و مقررات رانندگی از جمله محدودیت سرعت، اولویت پیاده‌روها، استفاده از کمربند ایمنی، عدم تلفن همراه گرفتن در حین رانندگی و... می‌تواند به کاهش تصادفات کمک کند.
۲. افزایش آگاهی عمومی. ارائه آموزش‌های رانندگی و آگاهی عمومی درباره تصادفات و خطرات رانندگی، به خصوص در شرایط خاصی مانند دوران کرونا، می‌تواند به افزایش آگاهی رانندگان و رفتارهای ایمن رانندگی کمک کند.
۳. اصلاح رفتار رانندگان. توجه اهمیت رفتار ایمن رانندگی و ارتقای مهارت‌های رانندگی ایمن، از جمله عدم مصرف مواد مخدر و الکل، اجتناب از تلفن همراه، عدم عجله و... می‌تواند تصادفات را کاهش دهد.
۴. اصلاح زیرساخت‌های رانندگی. بهبود زیرساخت‌های رانندگی شهری مانند نصب سیستم‌های ایمنی و ارتقای تجهیزات رانندگی مانند تابلوها و علائم راهنمایی و رانندگی، می‌تواند به افزایش ایمنی رانندگی و کاهش تصادفات کمک کند.
۵. استفاده از فناوری. انتشار فناوری‌های مدرن و هوشمند در خودروها و زیرساخت‌های راهنمایی و رانندگی، مانند سیستم‌های هشدار و کنترل ترافیک، سیستم‌های هوشمند شهری، کنترل هوشمند ترافیک، و همچنین استفاده از سامانه‌های حمل و نقل عمومی پیشرفته، می‌تواند به کاهش تصادفات درون شهری کمک کند.

سپاسگزاری

پارامترهای مختلف دیگر بر شدت تصادفات شهر رشت نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- افزایش تصادفات در دوران همه‌گیری کرونا با توجه به اعمال محدودیت‌های تردد، یکی از موارد قابل تأمل می‌باشد، که می‌توان تأثیر روانی شیوع کرونا بر شرایط جامعه را یکی از علل افزایش تصادف دانست.
- ۲- علت تامه عدم توجه به جلو یکی از شایعترین علت‌های تصادفات در نحوه برخورد جلو به جلو و جلو به پشت است. مهمترین علت عدم توجه به جلو در دوران کرونا می‌توان به برقراری تماس‌های آنلاین و تصویری در حین رانندگی دانست.
- ۳- شایعترین نحوه برخورد در تصادفات شهر رشت، برخورد جلو به جلو و برخورد جلو به پهلو است که لزوم توجه به بسترسازی مناسب برای توجه به رعایت حق تقدم را گوشزد می‌کند.
- ۴- با توجه به مدل نهایی به دست آمده از شدت تصادفات شهر رشت، متغیرهای مستقل روز چهارشنبه، رانندگان بالای ۶۰ سال، راننده مرد مقصر، نحوه برخورد جلو به جلو و وسایل نقلیه مقصر پرايد سبب افزایش احتمال وقوع تصادف فوتی یا جرحی نسبت به تصادف خسارتی می‌شوند. متغیرهایی با ضرایب منفی (ساعت ۶ تا ۲۱، شرایط سطح راه خشک، آب و هوایی و وضعیت روشنایی روز) سبب کاهش احتمال وقوع تصادف فوتی یا جرحی نسبت به تصادف خسارتی می‌شوند.

پیشنهادهات

کاهش تصادفات درون شهری می‌تواند بهبود ایمنی جامعه و کاهش صدمات جسمی و مالی ناشی از تصادفات را به همراه

مراجع

1. J. Li, Z. Zhao, "Impact of COVID-19 Travel-Restriction Policies on Road Traffic Accident Patterns with Emphasis on Cyclists: A Case Study of New York City" *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 167, 2022.
2. Ò. Saladié, E. Bustamante, A. Gutiérrez, "COVID-19 Lockdown and Reduction of Traffic Accidents in Tarragona Province, Spain" *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, Vol. 8, 2020.
3. Md. E. Shaik, S. Ahmed, an Overview of the Impact of COVID-19 on Road Traffic Safety and Travel Behavior. *Transportation Engineering*, Vol. 9, September 2022.

4. I. Bargegol, M. Kiomarsi, "Investigating Parameters Affecting Motorcyclist Injury Accidents on Urban Roads" *Guilan Police Science Journal*, 13th row, 2015. (In Persian)
5. I. Brgegol, M. Somesaraei, "Statistical Analysis of Inner-City Accidents Based on Vehicle Type Using Logistic Model", *Master's Thesis, Road and Transportation, Gilan University*, 2015. (In Persian)
6. P. Gripe, Accident Prediction Models for Urban Roads, *Accident analysis & Prediction*, Vol. 35, no. 2, pp. 273- 285, 2003.
7. X. Yan, E. Radwan, M A. Aty, Characteristics of Rear- End Accident at Signalized Intersection Using Multiple Logistic Regression Model, *Accident analysis & Prevention*, Vol. 37, 2005, pp. 983- 995, 2005.
8. V. Najafi Moghaddam Gilani, S. M. Hosseinian, M. Ghasedi, M. Nikookar, "Data-Driven Urban Traffic Accident Analysis and Prediction Using Logit and Machine Learning-Based Pattern Recognition Models", *Mathematical problems in engineering*, Article ID 9974219, 2021.
9. H. Bhuiyan, J. Ara, K. Md. Hasib, Md. I. H. Sourav, F. B. Karim, C. Sik-Lanyi, G. Governatori, A. Rakotonirainy, S. Yasmin "Crash Severity Analysis and Risk Factors Identification Based on an Alternate Data Source: a Case Study of Developing Country", *Scientific Reports*, Vol. 12, Article number: 21243, 2022.
10. I. Bargegol, M. Nazeri, V. Najafi Moghaddam Gilani, "Modeling of urban accidents using logistic regression", *the first national conference on road and transportation engineering Gilan University*, 2017. (In Persian)

Semi-Active Control of Three-Story Benchmark Structure using a Wireless Sensor Network

Research Article

Hossein Fazaeli¹, Abbas Karamodin² DOI: [10.22067/jfcej.2023.79624.1195](https://doi.org/10.22067/jfcej.2023.79624.1195)

1. Introduction

Traditional active, semi-active, and hybrid structural control systems often use cables to communicate between sensors, controllers, and actuators. In such systems, installing wired sensors is usually very time-consuming and expensive. Moreover, it is difficult to establish such extensive cabling in large-scale civil structures. In order to reduce the financial and time costs of wire-based systems, new wireless communication technologies have been used in structures in academic and industrial research for wireless measurement and monitoring. Recently, wireless structural control has been introduced as an alternative method to wired control systems. Lower installation time and maintenance cost along with lower energy consumption make wireless control more attractive compared to classical control system.

In previous researches, the wireless control system has been studied on various structures. This study examined using a wireless sensor network and its implementation on a three-story benchmark structure, and designing controller. Moreover, fuzzy control trained by genetic algorithm was used to control the system considering time delay.

2. Statement of the problem

Figure 1 shows the general strategy of wireless control. In this model, together with base excitation, the sensors transmit their measured data to the controller through the network. The measured data of dampers in previous step is also sent to the controller by another wireless network. After determining the required voltage of the damper, the controller sends the data through another network to the sensors in the floors. All wireless networks transmit data with the collected noises to the source sensor.

3. Numerical modeling

For numerical study a three story benchmark building was selected. This structure is 36.58 m by 54.87 m in plan, and 11.89 m in elevation. The bays are 9.15 m on center, in both directions, with four bays in the north-south (N-S) direction and six bays in the east-west (E-W) direction.

The building's lateral load-resisting system is comprised of steel perimeter moment-resisting frames (MRFs) with simple framing between the two furthest south E-W frames. The interior bays of the structure contain simple framing with composite floors.

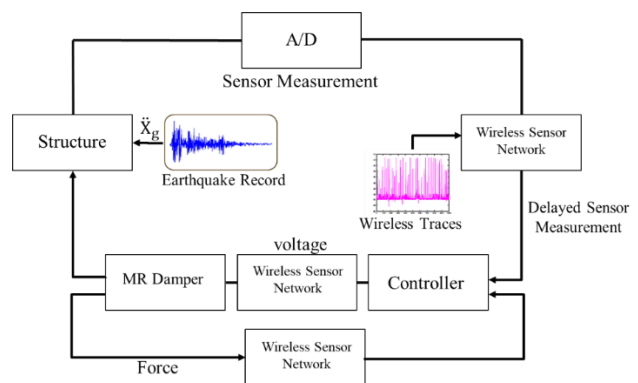


Figure 1. An overview of wireless benchmark model

The control strategy implemented is semi-active. Semi-active control has the advantages of both active and passive systems at the same time. Some prominent features such as good control, low cost, and low energy consumption make this system a high efficient one. In the control process, the control device can adjust its parameters using external energy. On the other hand, no additional energy is applied to the floors. As a result, the system is always stable.

In this structure, due to the limitation in MR damper capacity, three actuators in the first floor and two actuators in the second and third floors are installed. A phenomenological model of an MR damper, based on a Bouc-Wen element, is employed in the analysis. In order to evaluate proposed control strategies, four historical records are selected: i) El Centro; ii) Hachinohe; iii) Northridge; and iv) Kobe.

Six evaluation criteria related to the building responses were used. The first three criteria are based on peak inter-story drift ratio (J_1), level acceleration (J_2), and base shear

*Manuscript received: November 19, 2022, Revised, April 30, 2022, Accepted, June 28, 2022.

¹ Ph.D. Candidate in Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

² Associate Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: a-karam@um.ac.ir

(J_3). The next three criteria are based on normed building responses. The inter-story drift (J_4), level acceleration (J_5), and base shear (J_6) are defined in their normed based forms.

The wireless network model is implemented in TOSSIM. To realistically simulate the wireless network, experimentally collected noise traces and received signal strength indication (RSSI) traces are utilized as inputs to TOSSIM. The network employs a TDMA protocol that divides time into time slots synchronized among all sensors, and each time slot can accommodate the transmission of a data package. WSN standards based on IEEE 802.15.4 radios commonly employ 10-ms time slot. The amount of time delay in the whole system is 30-ms.

3. Controller

The proposed controller of Fazaeli and Karamodin, which includes a linear LQG controller and an optimized fuzzy controller, was used. In the proposed system, the acceleration of the floors is selected as the input of the LQG linear controller, and then the output of the controller is the required force of the damper. The force of the LQG linear controller and the force generated by the MR damper in the previous step are the inputs of the Takagi-Sugeno fuzzy controller. The output parameters of the fuzzy model are calculated by the genetic algorithm in such a way that the desired objective function is minimized. The optimization criteria is to minimize peak inter-story drift ratio of controlled to uncontrolled structure. First, the controller is trained by genetic algorithm for 1.5 scale of El Centro earthquake by MATLAB software, and then the performance of the wireless controller is evaluated in other earthquakes with different intensities.

4. Conclusion

This study focused on developing a control system for the nonlinear 3-story benchmark building with wireless sensor network. The MR damper was controlled using a Fuzzy-Genetic algorithm that supplies continuously varying command voltages. In general, the use of wireless control caused a slight increase in the responses of the structure compared to the wireless mode due to longer time delay. Based on the numerical simulations, the following conclusions are drawn:

1. The results show that both wired and wireless controls have a suitable performance in reducing structural responses such as displacement and acceleration and have close performance to each other;
 2. Both types of wired and wireless control in El Centro and Hachinohe reduced the amount of relative displacement and acceleration of floors compared to the uncontrolled state;
 3. The acceleration values are close to the uncontrolled state in El Centro earthquake. However, wired control has a better performance at the first and second floors;
 4. The maximum relative displacement of the floors in the structure with wireless sensor decreased compared to the uncontrolled structure in Kobe earthquake;
 5. The performance of the wireless system was suitable in reducing the maximum acceleration of the floors in the Kobe earthquake and it was able to reduce the acceleration of the second and third floors compared to the wired control;
 6. Wireless control caused a 17% increase in first evaluation criteria (J_1) compared to the wired mode;
 7. In the second evaluation criterion (J_2), which shows the maximum acceleration of the floors of the controlled structure to the uncontrolled structure, the wireless control shows a 13% increase compared to the wired mode;
 8. The average maximum base shear of the controlled to uncontrolled structure (J_3) in the wireless structure increased by 15% compared to the wired system.
-



کنترل نیمه فعال سازه سه طبقه محک به کمک شبکه سنسورهای بی سیم*

مقاله پژوهشی

عباس کرم الدین^(۲)

سیدحسین فضائلی حسینی نژاد^(۱)

DOI: 10.22067/jfcei.2023.79624.1195

چکیده کنترل سازه‌ها به منظور جلوگیری از آسیب جادی به سازه‌ها، به یک موضوع برجسته در مهندسی زلزله تبدیل شده است. در سیستم‌های سنتی کنترل سازه از سیم برای ارتباط بین سنسورها، محرک‌ها، کنترل‌کننده‌ها و یکپارچه‌سازی کل سیستم به عنوان یک شبکه واحد استفاده می‌شد. بهره جویی از سنسورهای بی سیم به منظور اندازه‌گیری، ارتباط و کنترل در سازه‌ها با پیشرفت تکنولوژی افزایش یافته است. از مزایای دیگر این سیستم، سهولت در پیاده سازی و کاهش هزینه‌های نصب می‌باشد. در این مقاله سازه سه طبقه غیرخطی محک (Benchmark) به همراه میراگر مغناطیسی (MR) که به شبکه سنسورهای بی سیم مجهز شده است، مورد بررسی قرار گرفته است. سازه تحت تحریک زلزله در محیط شبیه ساز متلب ۲۰۱۸ با یک شبکه ح سگر بی سیم شبیه سازی شده توسط TOSIM ترکیب می‌شود. برای شبیه‌سازی واقعی شبکه از نویز و سیگنال‌های بی سیم جمع آوری شده از یک سازه واقعی استفاده شده است. در این شبکه از یک پروتکل دسترسی چندگانه تقسیم زمان TDMA استفاده شده است. این پروتکل به هر سنسور زمان خاصی برای ارسال اطلاعات اختصاص می‌دهد. برای کنترل پاسخ‌های سازه محک از یک کنترل‌کننده فازی-ثرتیک استفاده شده است. سپس سازه مجهز به سنسورهای بی سیم و با سیم، تحت تحریک زلزله‌های مختلف مورد بررسی، مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. بررسی معیارهای ارزیابی و نمودارهای تاریخچه زمانی نشان از عملکرد مناسب سیستم بی سیم در کاهش پاسخ‌های سازه دارد. در عین حال سیستم بی سیم، باعث افزایش اندک میزان میانگین جابه‌جایی و شتاب طبقات نسبت به حالت باسیم شده است.

واژه‌های کلیدی سازه محک، سنسورهای بی سیم، سازه غیرخطی، میراگر مغناطیسی، کنترل نیمه فعال.

Semi-active control of three-story benchmark structure using a wireless sensor network

Hossein Fazaeli

Abbas Karamodin

Abstract Control of structures in order to prevent serious damage to structures has become a prominent issue in earthquake engineering. In traditional structural control systems, wires were used to communicate between sensors, actuators, controllers and integrate the entire system as a single network. Using of wireless sensors for measurement, communication and control in structures has increased with the advancement of technology. The use of this technology has attracted the attention of engineers due to the reduction of installation costs and flexible system. In this article, the benchmark nonlinear three-story structure with magnetorheological damper (MR) equipped by wireless sensor network is investigated. The seismically excited building is combined with a wireless sensor network simulated by TOSIM in the MATLAB 2018 simulator environment. For real network simulation, noise and wireless signals collected from a real structure have been used. In this network, a time division multiple access protocol (TDMA) is used. This protocol assigns a specific time to each sensor to send information. The benchmark structure is trained by a fuzzy-genetic controller. Then, the structure equipped with wire and wireless sensors was evaluated under the various earthquakes. Examining the evaluation criteria and time history charts shows the proper performance of the wireless system in reducing structural responses. At the same time, the wireless system has caused a slight increase in the average displacement and acceleration of floors compared to the wired mode.

Keywords Benchmark structure, Wireless sensor, nonlinear building, magnetorheological damper, Semi active control.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۸/۲۸ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۴/۷ می‌باشد

(۱) دانشجوی دکترای دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: دانشیار دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران.

مقدمه

سیستم‌های سنتی کنترل سازه فعال، نیمه فعال و ترکیبی اغلب از کابل‌ها برای ارتباط بین سنسورها، کنترل‌کننده‌ها و محرک‌ها استفاده می‌کنند. در چنین سیستم‌هایی، نصب سنسورهای سیمی معمولاً بسیار وقت‌گیر و گران است. علاوه بر این، استقرار چنین کابل‌کشی گسترده در سازه‌های عمرانی در مقیاس بزرگ کاری دشوار است [1-3]. به منظور کاهش هزینه‌های مالی و زمانی سیستم‌های مبتنی بر سیم، فناوری‌های جدید ارتباطات بی‌سیم در سازه‌ها در تحقیقات دانشگاهی و صنعتی برای سنجش و نظارت بی‌سیم استفاده شده است. در سال‌های اخیر، علم کنترل سازه بی‌سیم به عنوان جایگزینی برای سیستم‌های کنترل همراه با سیم معرفی شده است. کاهش زمان نصب، کاهش هزینه تعمیر و نگهداری همراه با مصرف انرژی کم، کنترل بی‌سیم را در مقایسه با سیستم کنترل کلاسیک بسیار جذاب می‌کند. تحقیقات عددی و آزمایشگاهی بسیاری بر روی سازه‌های مجهز به این نوع سنسورها صورت گرفته است. Wang و همکاران یک سازه سه طبقه مجهز به میراگر MR با مقیاس ۰/۵ را مورد تحلیل عددی و آزمایشگاهی قرار دادند. هر دو نتایج تجربی و عددی نشان از کارایی کنترل بی‌سیم غیرمتمرکز برای سیستم‌های کنترل سازه‌ای دارد [4]. Lynch و همکاران [5] با هدف کنترل سازه بی‌سیم به کمک تعداد زیادی از سنسور، یک سیستم بی‌سیم غیرمتمرکز را مورد بررسی قرار دادند. آنها سه سیستم کنترل غیرمتمرکز را مورد بررسی قرار دادند. سیستم کنترلی غیرمتمرکز عملکرد بهتری نسبت به دو سیستم دیگر داشت. Sun و همکاران [6] یک سازه میراگر جرم فعال را به شبکه سنسورهای بی‌سیم مجهز کردند. آنها مدلی عددی را به عنوان سازه محک معرفی کرده تا محققان با کار بر روی این سازه مرجع بتوانند الگوریتم‌های کنترلی و مسائل سنسورهای بی‌سیم را مورد تحقیق و بررسی قرار دهند. شبکه بی‌سیم مورد استفاده در این پژوهش، مدل محک Sun و همکاران می‌باشد.

وجود کابل در یک سیستم کنترل بی‌سیم تا حد ممکن به حداقل رسیده است. با این وجود چالش‌های ذاتی در ارتباط با سیستم بی‌سیم مانند تأخیر زمانی و از بین رفتن داده‌ها وجود دارد. یکی از راه‌های کاهش این اثرات استفاده از استراتژی‌های کنترل غیرمتمرکز (Decentralized control) یا تقریباً غیرمتمرکز (Partially decentralized control) در سیستم‌ها است. از طرف دیگر، الگوریتم‌های کنترل سازه‌ای که این اثرات را در

نظر می‌گیرند، باید در سیستم پیاده‌سازی شوند. یک الگوریتم کنترل غیرمتمرکز توسط Linderman بر روی یک سازه برشی مجهز به میراگر AMD یک طبقه در مقیاس کوچک اجرا شد. تأخیر ورودی با افزودن یک تأخیر زمان گسسته در فضای حالت لحاظ شد [7]. یک کنترل‌کننده غیرمتمرکز H2/LQG با تأخیر زمانی بر روی مدل پل کابلی معیار توسط فلاح و تقی‌خانی، پیشنهاد و مورد مطالعه قرار گرفت. تأخیر زمان انتقال بی‌سیم به عنوان یک مرحله تأخیر در اندازه‌گیری سیستم زمان گسسته مدل می‌شود. کنترل‌کننده غیرمتمرکز با حل سه معادله غیرخطی همراه با روش مبتنی بر گرادیان محاسبه می‌شود. کنترل غیرمتمرکز با تأخیر زمانی می‌تواند به طور مؤثری پاسخ لرزه‌ای پل کابل معیار را کاهش دهد [8]. محققان دانشگاه میشیگان یک شبکه حسگر بی‌سیم (WSN) را در یک سازه برشی شش طبقه با دستگاه‌های کنترل نیمه فعال مستقر کردند. در پژوهش آنها یک کنترل‌کننده LQR با استراتژی تقریباً غیرمتمرکز ارائه شده است که از تخمین حالت اضافی (Redundant state estimation) به عنوان ابزاری برای به حداقل رساندن نیاز به برقراری ارتباط داده‌های بین سنسورها استفاده می‌کند. این روش با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی از یک مدل ساختمان شش طبقه تحت تحریک زلزله صحت‌سنجی شد [9]. در پژوهش‌های پیشین، سیستم کنترل بی‌سیم بر روی سازه‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از یک شبکه سنسورهای بی‌سیم بر روی یک سازه محک معتبر تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله استفاده از یک شبکه سنسور بی‌سیم و پیاده‌سازی آن روی سازه محک سه طبقه و همچنین طراحی یک کنترل‌کننده فازی - ژنتیک مورد بررسی قرار گرفته و مقایسه نتایج آن با سنسورهای باسیم انجام شده است. همچنین برای جبران تأخیر زمانی، از یک کنترل فازی آموزش داده شده توسط الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

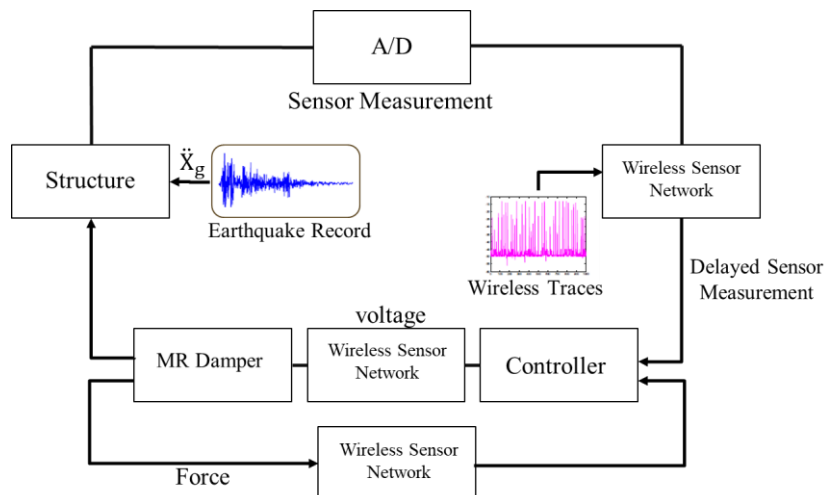
در شکل (۱) راهبرد کلی کنترل بی‌سیم به نمایش در آمده است. در این مدل پس از تحریک پایه، سنسورها اطلاعات اندازه‌گیری شده خود را توسط شبکه به کنترل‌کننده منتقل می‌کنند. اطلاعات یک گام قبل میراگر نیز توسط شبکه دیگری به کنترل‌کننده فرستاده می‌شود. کنترل‌کننده پس از تعیین ولتاژ مورد نیاز میراگر، اطلاعات را توسط شبکه دیگری به سنسورهای موجود در طبقات می‌فرستد. تمامی شبکه‌های بی‌سیم، اطلاعات را همراه با نویزهای جمع‌آوری شده به

سنسور مبدأ انتقال می‌دهند.

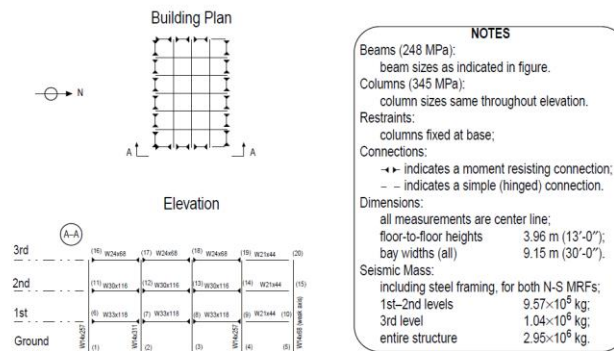
سازه محک

مدل مورد استفاده در این پژوهش یک سازه غیرخطی ۳ طبقه محک می‌باشد که در شکل (۲) به نمایش در آمده است. ابعاد پلان این سازه ۳۶/۵۸ متر در ۵۴/۸۷ متر می‌باشد. ارتفاع هر طبقه ۳/۹۶ متر و ارتفاع کلی ساختمان ۱۱/۹۶ متر می‌باشد. فاصله محور تا محور ستون‌ها ۹/۱۵ متر است. چهار دهانه در راستای شمال به جنوب و شش دهانه در راستای شرق به غرب وجود دارد. سیستم مقاوم جانبی سازه در دو جهت در قاب‌های پیرامونی از نوع خمشی و قاب‌های داخلی از نوع مفصلی می‌باشد [10].

با توجه به اینکه دو قاب پیرامونی در تحمل نیروهای زلزله نقش دارند، می‌توان با تقسیم نیروی زلزله به قسمت مساوی بین دو قاب، آن را به صورت یک قاب دوبعدی مدل‌سازی و



شکل ۱ راهبرد کنترل بی‌سیم



شکل ۲ توصیف ساختمان ۳ طبقه محک برای ارزیابی در این مطالعه [10]

MR پیشنهاد شده است [11,12]. معادلات (۴-۱) معادلات حاکم بر مدل سازی این میراگر می باشند.

$$f = c_0 \dot{x} + \alpha z \quad (۱)$$

$$\dot{z} = -\gamma | \dot{x} | z | z |^{n-1} - \beta \dot{x} | z |^n + A \dot{x} \quad (۲)$$

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b u \quad (۳)$$

$$\alpha = c_{0a} + c_{0b} u \quad (۴)$$

در این روابط x جابه جایی نسبی دو سر میراگر و z متغیر تکاملی وابسته به تاریخچه پاسخ می باشد. با استفاده از پارامترهای α, β, γ می توان شیب رفتار خطی و همچنین انحنا ناحیه گذر از خطی به غیر خطی را تغییر داد. خروجی جریان مدار الکتریکی توسط رابطه (۵) تعیین می شود.

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (۵)$$

ظرفیت میراگر انتخاب شده ۱۰۰۰ کیلو نیوتن و مشخصات مکانیکی آن در جدول (۱) ارائه شده است.

شبکه سنسورهای بی سیم

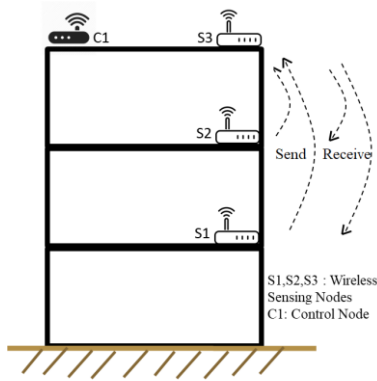
مدل سازی شبکه که شامل مسیرهای نویز/سیگنال، توپولوژی بی سیم و پروتکل های شبکه می باشد، توسط شبیه ساز TOSSIM پیاده سازی شده است. برای شبیه سازی واقعی شبکه، نویزهای تجربی و شاخص قدرت مسیرهای سیگنال دریافت شده (RSSI) (Redundant state estimation) به عنوان ورودی TOSSIM استفاده شده است. این مقادیر به صورت فیزیکی توسط دستگاه های خاصی اندازه گیری و به عنوان ورودی شبیه ساز استفاده شده است. این شاخص معیاری برای کیفیت سیگنالی است که می تواند از مسیر یاب دریافت کند. این مسیرها توسط دستگاه های Telosb که به رادیو TI CC2420 مجهز شده اند و طبق استاندارد IEEE 802.15.4 می باشند، در یک سازه پنج طبقه در دانشگاه واشنگتن مستقر شده اند.

در کنترل نیمه فعال با اعمال کنترل های فعال و مقاوم به طور هم زمان بر روی سازه به طور کامل از مزایای هر دو روش استفاده می شود. برخی ویژگی های بارز از جمله کنترل خوب، هزینه پایین، مصرف انرژی ناچیز و کاربرد آسان، این سیستم را به سیستمی با کارایی بالا تبدیل کرده است. با این حال، در فرایند کنترل، دستگاه کنترل می تواند به طور لحظه ای پارامترهای خود را با استفاده از انرژی خارجی تنظیم کند. در سویی دیگر انرژی مکانیکی اضافی به سیستم وارد نمی شود. در نتیجه می تواند پایداری سیستم را تضمین کند. به طور کلی، کنترل نیمه فعال به عنوان نوعی سیستم غیر فعال با قابلیت کنترل در نظر گرفته می شود. با قطع منبع انرژی این سیستم می تواند بلافاصله به سیستم کنترل غیر فعال تبدیل شود تا نقش کنترل کننده را ایفا کند. کنترل نیمه فعال در اصل نوعی کنترل کننده پارامتر است که با تغییر سختی یا میرایی سازه، ارتعاش سازه را کاهش می دهد. بنابراین این فناوری کاربردهای گسترده ای در علوم مهندسی دارد.

میراگر MR از نوع میراگرهای با قابلیت کنترل سیال هستند. مایعات مگنتورئولوژیکال (MR) از مایعات چسبناک حاوی ذرات میکرونی شده از مواد مغناطیسی تشکیل شده است. هنگامی که مایع در معرض میدان مغناطیسی قرار می گیرد، ذرات، ساختارهایی ستونی ایجاد می کنند که برای شروع جریان نیاز به اعمال حداقل تنش برشی دارند. این اثر برگشت پذیر و بسیار سریع است به طوری که زمان واکنش آن در حد میلی ثانیه می باشد. برخی از مایعات در میدان الکتریکی رفتار یکسانی دارند. این مایعات، الکتورئولوژیکال (ER) نامیده می شوند. با این حال، عملکرد آنها با توجه به امکان شکست میدان الکتریکی محدود است و در حال حاضر نسبت به میراگرهای MR کاربرد کمتری دارد. از چالش های مرتبط با این میراگرها مدل سازی دقیق رفتار چرخه ای غیرخطی آنها است. یک مدل ساده مکانیکی براساس مدل بوک-ون در کنار یک میراگر ویسکوز برای مدل سازی دقیق رفتار برشی میراگر

جدول ۱ مشخصات مکانیکی میراگر مغناطیسی MR

parameter	Value	parameter	Value	parameter	Value
α_a	1.0872e5 N / m	c_{0b}	44.0 N $\frac{s}{cmV}$	γ	3 cm ⁻¹
α_b	4.9616e5 N / (cm V)	A	1.2	β	3 cm ⁻¹
c_{0a}	4.4 N s / cm	n	1	η	50 n ⁻¹

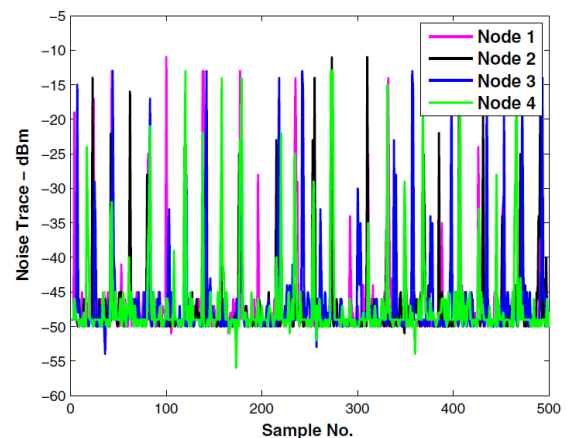


شکل ۴ نحوه ارتباط و قرارگیری سنسورها در سازه ۳ طبقه محک

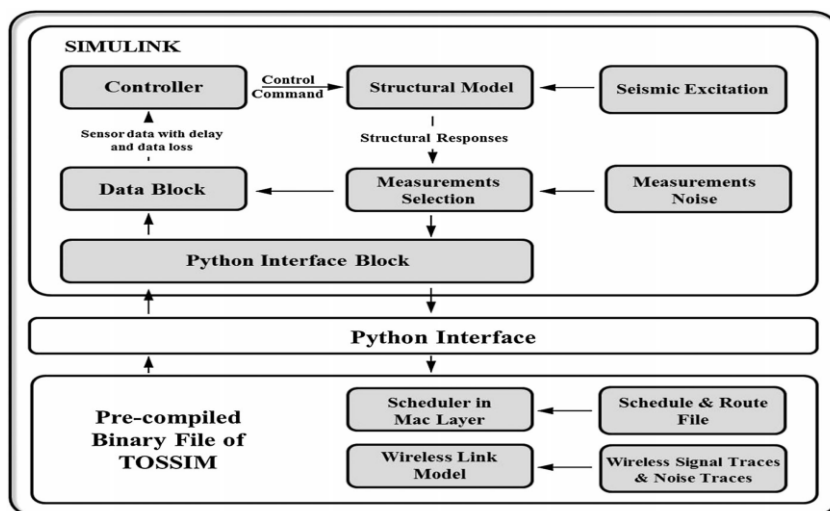
ساختار مدل محک کنترل بی سیم در شکل (۵) به نمایش در آمده است. مدل محک بی سیم در محیط متلب، شبیه سازی و اجرا می شود. انتقال داده ها از طریق شبکه بی سیم با استفاده از یک بلوک واسطه تعبیه شده برای ارتباط با پایتون انجام می شود. سپس برنامه پایتون ارتباط با TOSSIM را برقرار می کند. پس از تعیین مسیرها و برنامه انتقال که توسط مازول مدیر شبکه تعیین شده است، TOSSIM ارتباط بی سیم نقطه به نقطه داده های سنسور را از سنسورها به ایستگاه مبنا شبیه سازی می کند و سپس تأخیر بسته را به بلوک رابط پایتون از طریق رابط پایتون باز می گرداند. اطلاعات سنسور همراه با اطلاعات تأخیر زمانی به «بلوک داده» فرستاده می شود. سپس داده های تأخیری سنسورها، به سنسور مبنا یا کنترل کننده ارسال می شود. مدت زمان تأخیر سنسورها در هر شبکه ۱۰ میلی ثانیه می باشد.

IEEE 802.15.4 CC2420 یک تراشه واقعی ۲/۴ گیگاهرتزی

است که برای اهداف با مصرف پایین و ولتاژ کم مورد استفاده قرار می گیرد. نویزهای اندازه گیری شده در شکل (۳) به نمایش در آمده است. در سازه محک سه طبقه، یک سنسور مبنا در بام، سه سنسور برای اندازه گیری شتاب طبقات و سه سنسور نیز برای اندازه گیری نیروی هر طبقه مورد استفاده قرار گرفته است. نحوه استقرار و ارتباط این سنسورها با هم در شکل (۴) به نمایش در آمده است. این شبکه از پروتکل چندگانه تقسیم زمان TDMA بهره می برد که در آن زمان خاصی برای هر سنسور برای انتقال اطلاعات اختصاص می دهد. شبکه TDMA برای سیستم های کنترل، مطلوب است زیرا تأخیرهای تحت شبکه TDMA قطعی هستند. استاندارد شبکه مبتنی بر IEEE 802.15.4 معمولاً زمان ۱۰ میلی ثانیه را برای هر شیار در نظر می گیرد. میزان تأخیر زمانی در کل سیستم ۳۰ میلی ثانیه می باشد.



شکل ۳ نویزهای اندازه گیری شده سنسورها [6]



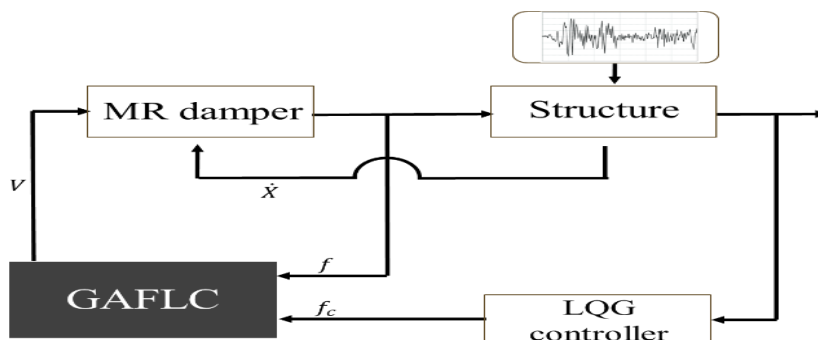
شکل ۵ ساختار مدل بی سیم [6]

کنترل کننده LQG و فازی-ژنتیک

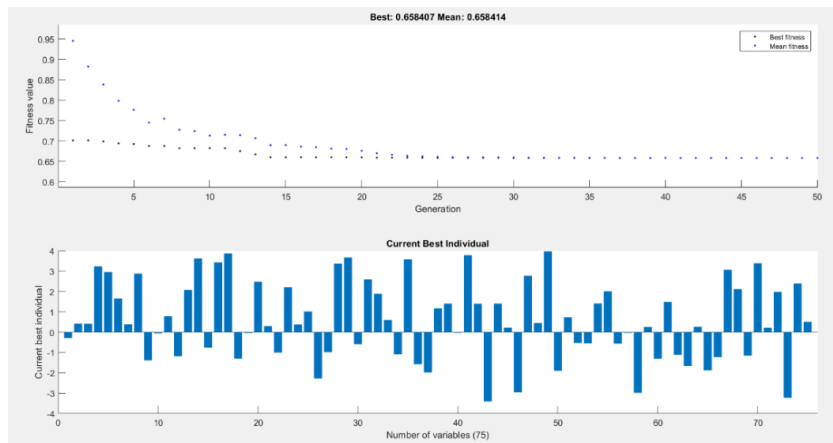
در این پژوهش از کنترل کننده ترکیبی فضائی و کرم الدین، که شامل یک کنترل کننده خطی LQG و یک کنترل کننده فازی بهینه شده می باشد، استفاده شده است [13]. هدف استفاده از کنترل کننده فازی، تعیین ولتاژ مورد نیاز میراگر MR و جبران خطای موجود بین نیروی کنترل کننده خطی و سازه غیرخطی و همچنین جبران تأخیر زمانی سیستم بی سیم می باشد. مطابق شکل (۶) در این سیستم پیشنهادی شتاب طبقات وارد کنترل کننده خطی LQG شده و سپس نیروی مورد نیاز برای کنترل سازه به دست می آید. نیروی کنترل کننده خطی LQG و نیروی تولید شده توسط میراگر MR در گام قبل وارد کنترل کننده فازی تاکاگی سوگنو می شود. هر طبقه کنترل کننده فازی مربوط به خود را دارد ولی قوانین برای هر سه ساختار فازی یکسان است. پارامترهای خروجی مدل فازی توسط الگوریتم ژنتیک به گونه ای تعیین می شوند که تابع هدف مورد نظر کمینه شود. معیار بهینه سازی، کمینه کردن بیشینه نسبت تغییر مکان سازه کنترل شده به کنترل نشده است. پس از آموزش سیستم، کارایی کنترل کننده بی سیم در زلزله های مختلف مورد ارزیابی و تحلیل قرار می گیرد. پایگاه قوانین فازی در جدول (۲) به نمایش در آمده است.

جدول ۲ پایگاه قوانین فازی

		LQG force				
Measured Force		NL	NE	ZE	PO	PL
	NL	mf1	mf2	mf3	mf4	mf5
	NE	mf6	mf7	mf8	mf9	mf10
	ZE	mf11	mf12	mf13	mf14	mf15
	PO	mf16	mf17	mf18	mf19	mf20
	PL	mf21	mf22	mf23	mf24	mf25



شکل ۶ راهبرد کنترل فازی-ژنتیک [13]



شکل ۷ فرایند آموزش کنترل کننده فازی

شتاب طبقات، J3 حداکثر برش پایه، J4 حداکثر نرم جابه‌جایی نسبی طبقات، J5 حداکثر نرم شتاب طبقات و J6 حداکثر نرم برش پایه نسبت به سازه کنترل نشده هستند.

در روابط جدول، i شماره طبقات، $d_i(t)$ جابه‌جایی نسبی طبقات، h_i ارتفاع طبقه، $\delta^{\max}$ حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات تحت اثر زلزله‌های مختلف می‌باشد. شتاب طبقه با $\ddot{x}_{ai}(t)$ ، $\ddot{x}_a^{\max}$ حداکثر شتاب مطلق طبقات در حالت کنترل نشده، m_i جرم طبقه و $F_b^{\max}$ حداکثر برش پایه زلزله در حالت کنترل نشده است. مقدار نرم از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\| \cdot \| = \sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} [\cdot]^2 dt} \quad (2)$$

که در آن t_f مدت زمان زلزله و پس از آن می‌باشد به طوری که پاسخ سازه به صفر میل کند که این مقدار برای زلزله‌های ال‌سنترو، هاپچینوه و نورث‌ریج ۱۰۰ ثانیه و برای زلزله کوبه ۱۸۰ ثانیه می‌باشد.

حداکثر نرم جابه‌جایی نسبی $\| \delta^{\max} \|$ ، حداکثر نرم شتاب طبقات $\| \ddot{x}_{ai}(t) \|$ و $\| F_b^{\max} \|$ حداکثر نرم برش پایه در حالت کنترل نشده است.

مقایسه معیارهای ارزیابی سازه در دو حالت کنترل بی‌سیم و کنترل باسیم در جدول (۵) آورده شده است. مقدار میانگین معیار بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات سازه کنترل شده به سازه کنترل نشده (J1) در حالت باسیم و بی‌سیم به ترتیب ۰/۵۲۴ و ۰/۶۱۷ می‌باشد. در حالت کنترل بی‌سیم شاهد افزایش ۱۷

نتایج عددی

در شکل (۷) فرایند آموزش کنترل کننده فازی در سازه ۳ طبقه بی‌سیم نشان داده شده است. در شکل (۹ و ۸) پاسخ تاریخیچه زمانی جابه‌جایی و تاریخیچه زمانی شتاب طبقه سوم در حالت کنترل باسیم، بی‌سیم و کنترل نشده به نمایش در آمده است. نتایج نشان می‌دهد که هر دو کنترل بی‌سیم و باسیم عملکرد مناسبی در کاهش پاسخ‌های سازه از جمله جابه‌جایی و شتاب دارند و عملکرد نزدیکی نسبت به یکدیگر دارند. به منظور مطالعه بیشتر مقادیر بیشینه جابه‌جایی نسبی و همچنین بیشینه شتاب طبقات در شکل (۱۰) به تصویر در آمده است. در دو زلزله ال‌سنترو و هاپچینوه هر دو نوع کنترل باسیم و بی‌سیم مقدار جابه‌جایی نسبی و شتاب طبقات را نسبت به حالت کنترل نشده کاهش داده‌اند. در زلزله ال‌سنترو مقادیر شتاب به حالت کنترل نشده نزدیک شده است. در زلزله نورث‌ریج عملکرد کنترل بی‌سیم بسیار به کنترل باسیم نزدیک شده است. هر چند کنترل باسیم عملکرد بهتری در طبقات اول و دوم دارد. در زلزله کوبه نیز بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات در سازه مجهز به سنسور بی‌سیم نسبت به سازه کنترل نشده کاهش داشته است و عملکرد نزدیکی با کنترل باسیم دارد. عملکرد بیشینه شتاب طبقات در زلزله کوبه مناسب بوده و توانسته شتاب طبقات دوم و سوم را نسبت به کنترل باسیم کاهش دهد.

در این پژوهش از ۶ معیار ارزیابی (J1-J6) مطابق جدول (۳) برای بررسی رفتار کنترل کننده بی‌سیم و مقایسه ساده‌تر آن با حالت باسیم استفاده شده است. معیارهای سنجش پاسخ سازه شامل معیار J1 حداکثر جابه‌جایی نسبی طبقات، J2 حداکثر

در میانگین این معیار هستیم. سازه مجهز به سنسور بی سیم باعث افزایش چشم گیر میزان نرم تغییر مکان نسبی طبقات، نرم شتاب و نرم برش پایه شده است که نشان می دهد ارتعاش سازه در انتهای زمان زلزله نیز ادامه دار می باشد. در شکل (۱۰) نمودار میله ای مقادیر میانگین معیارهای ارزیابی به تصویر در آمده است. در جدول (۴) نیز پارامترهای توابع نتیجه کنترل کننده فازی در سازه ۳ طبقه آورده شده است.

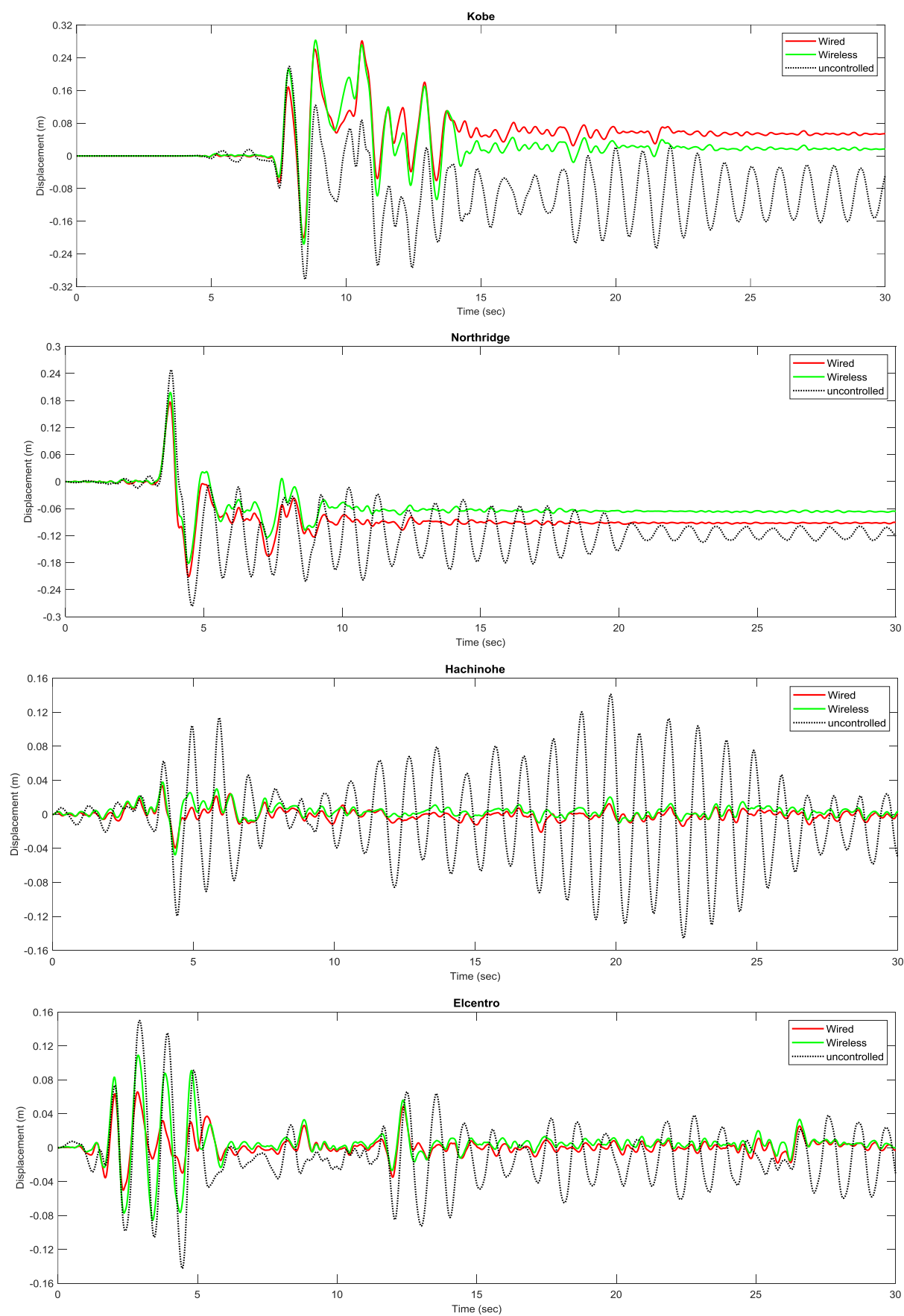
درصدی در میانگین این معیار هستیم. میانگین معیار ارزیابی J_2 که نشان دهنده بیشینه شتاب طبقات سازه کنترل شده به سازه کنترل نشده است، در کنترل با سیم 0.793 و در کنترل بی سیم 0.896 می باشد. مقدار افزایش در میانگین این معیار 13 درصد می باشد. میانگین بیشینه برش پایه سازه کنترل شده به کنترل نشده (J_3) در سازه با سیم 0.788 و در سازه مجهز به سنسورهای بی سیم 0.91 می باشد که شاهد افزایش 15 درصدی

جدول ۳ معیارهای ارزیابی سازه [10]

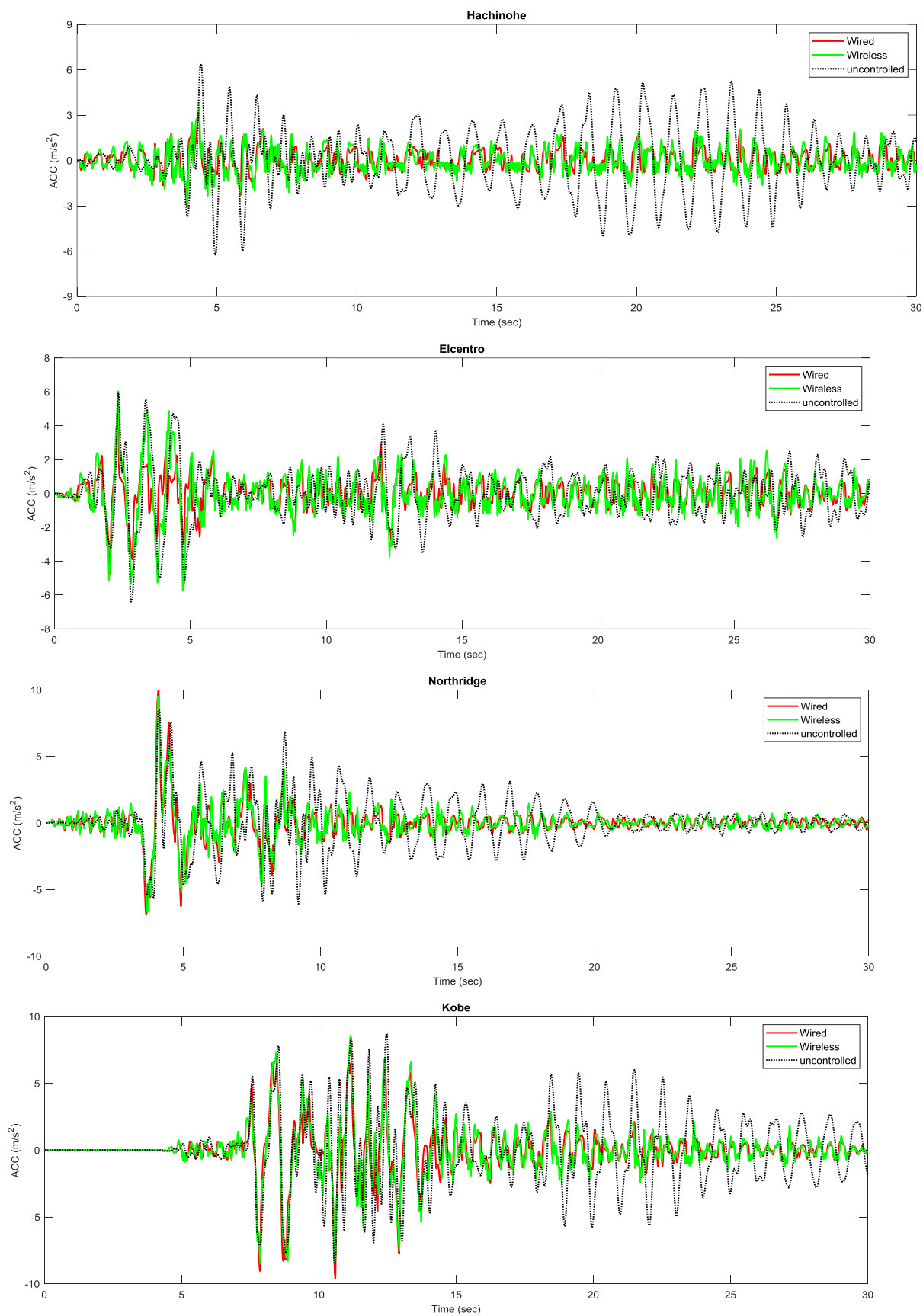
Interstory drift ratio	Level acceleration	Base shear
$J_1 = \max_{\substack{Elcentro \\ Hachinohe \\ Northridge \\ Kobe}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \left \frac{d_i(t)}{h_i} \right }{\delta^{\max}} \right\}$	$J_2 = \max_{\substack{Elcentro \\ Hachinohe \\ Northridge \\ Kobe}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \left \ddot{x}_{ai}(t) \right }{\ddot{x}_{ai}^{\max}} \right\}$	$J_3 = \max_{\substack{Elcentro \\ Hachinohe \\ Northridge \\ Kobe}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \left \sum_i m \ddot{x}_{ai}(t) \right }{F_b^{\max}} \right\}$
Normed interstory drift	Normed Level acceleration	Normed base shear
$J_4 = \max_{\substack{Elcentro \\ Hachinohe \\ Northridge \\ Kobe}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \left\ \frac{d_i(t)}{h_i} \right\ }{\left\ \delta^{\max} \right\ } \right\}$	$J_5 = \max_{\substack{Elcentro \\ Hachinohe \\ Northridge \\ Kobe}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \left\ \ddot{x}_{ai}(t) \right\ }{\left\ \ddot{x}_{ai}^{\max} \right\ } \right\}$	$J_6 = \max_{\substack{Elcentro \\ Hachinohe \\ Northridge \\ Kobe}} \left\{ \frac{\max_{t,i} \left\ \sum_i m \ddot{x}_{ai}(t) \right\ }{\left\ F_b^{\max} \right\ } \right\}$

جدول ۴ پارامترهای توابع نتیجه کنترل کننده فازی

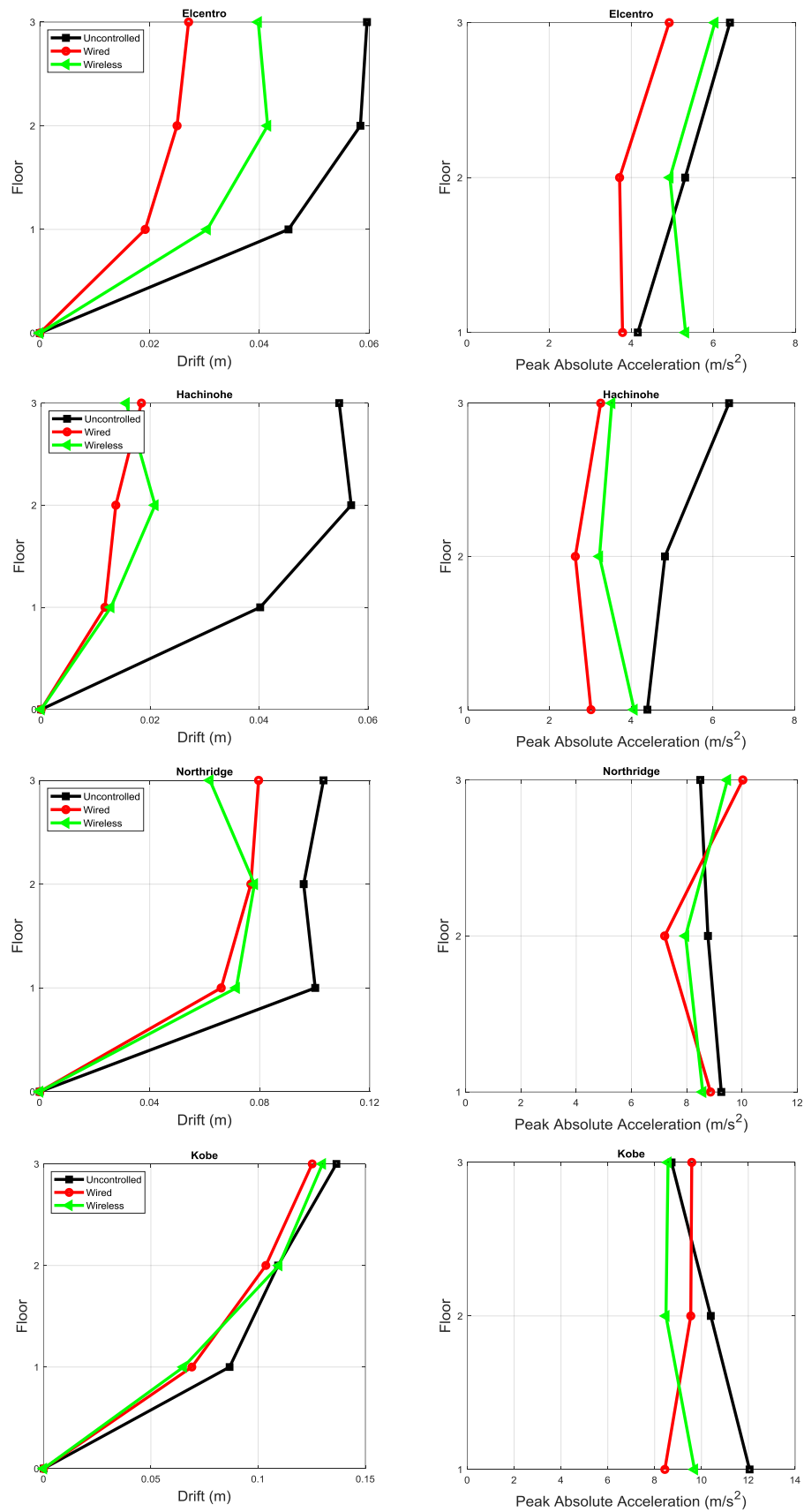
	p_i	q_i	r_i		p_i	q_i	r_i
mf1	-0.282	0.421	0.414	mf14	-0.029	3.788	1.397
mf2	3.234	2.959	1.656	mf15	-3.405	1.404	0.227
mf3	0.388	2.880	-1.378	mf16	-2.951	2.777	0.459
mf4	-0.051	0.790	-1.182	mf17	3.972	-1.894	0.735
mf5	2.077	3.627	-0.758	mf18	-0.525	-0.544	1.410
mf6	3.437	3.875	-1.294	mf19	2.013	-0.561	-0.029
mf7	-0.035	2.480	0.302	mf20	-2.977	0.257	-1.297
mf8	-1.003	2.211	0.381	mf21	1.488	-1.111	-1.660
mf9	1.022	-2.272	-0.981	mf22	0.265	-1.867	-1.220
mf10	3.375	3.673	-0.592	mf23	3.070	2.124	-1.152
mf11	2.598	1.887	0.606	mf24	3.390	0.222	1.980
mf12	-1.092	3.578	-1.575	mf25	-3.219	2.393	0.508
mf13	-1.974	1.171	1.406				



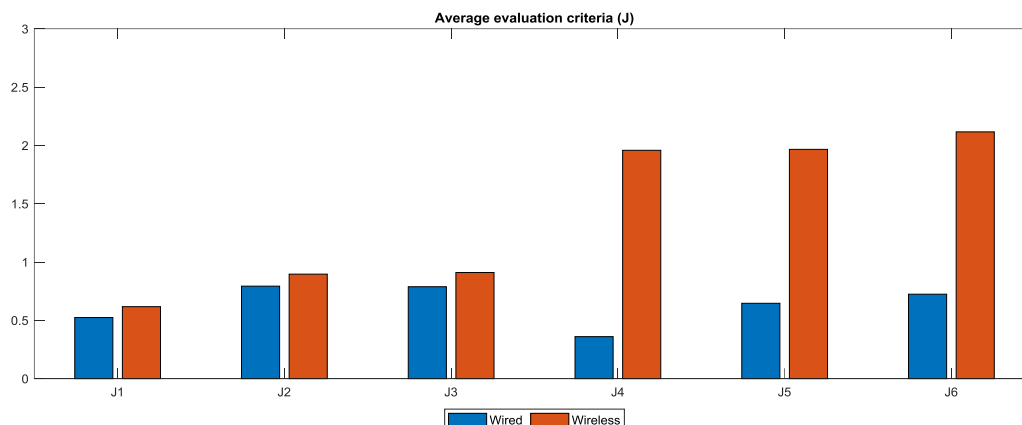
شکل ۸ تاریخچه جابه‌جایی طبقه سوم سازه تحت اثر زلزله‌های مختلف در حالت کنترل باسیم، بی‌سیم و کنترل نشده



شکل ۹ تاریخچه شتاب طبقه سوم سازه تحت اثر زلزله‌های مختلف در حالت کنترل باسیم، بی‌سیم و کنترل نشده



شکل ۱۰. بیشینه جابه‌جایی نسبی و بیشینه شتاب مطلق طبقات سازه در سه حالت کنترل باسیم، بی‌سیم و کنترل نشده



شکل ۱۱ نمودار میله‌ای میانگین معیارهای ارزیابی J1 تا J6 در سازه ۳ طبقه در دو حالت کنترل باسیم و بی‌سیم

جدول ۵ مقایسه معیارهای ارزیابی سازه سه طبقه در دو حالت کنترل باسیم و بی‌سیم

		Elcentro			Hachinohe			Northridge		Kobe		AVG
	Controller	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5	0.5	1	0.5	1	
J1	Wired	0.313	0.454	0.641	0.211	0.319	0.406	0.435	0.793	0.799	0.864	0.524
	Wireless	0.343	0.697	0.660	0.187	0.364	0.515	0.578	0.779	1.149	0.898	0.617
J2	Wired	0.595	0.752	1.010	0.568	0.496	0.735	0.855	1.045	1.080	0.795	0.793
	Wireless	0.718	0.923	1.15	0.668	0.628	0.988	1.041	0.988	1.050	0.806	0.896
J3	Wired	0.519	0.799	0.961	0.397	0.627	0.801	0.693	0.982	1.035	1.064	0.788
	Wireless	0.544	1.028	1.242	0.511	0.695	0.976	0.938	1.042	1.053	1.072	0.910
J4	Wired	0.229	0.294	0.281	0.099	0.127	0.167	0.193	0.818	0.794	0.604	0.360
	Wireless	0.938	1.558	1.698	0.424	0.517	0.695	0.345	2.715	6.267	1.428	1.958
J5	Wired	0.549	0.562	0.574	0.345	0.333	0.361	1.187	1.422	0.498	0.629	0.646
	Wireless	1.910	2.373	2.314	1.185	0.157	1.318	1.933	2.041	2.557	2.874	1.966
J6	Wired	0.605	0.615	0.615	0.375	0.365	0.398	1.408	1.606	0.543	0.706	0.724
	Wireless	2.114	2.492	2.377	1.256	1.236	1.407	2.19	2.266	2.693	3.131	2.116

نتیجه‌گیری

سیستم کنترل بی‌سیم پیشنهاد شده در این مقاله، به خوبی توانسته است پاسخ‌های سازه را کنترل کند. به طور کلی استفاده از کنترل بی‌سیم به دلیل تأخیر زمانی بیشتر باعث افزایش اندک پاسخ‌های سازه نسبت به حالت باسیم شده است. برای ارزیابی بهتر از ۶ معیار ارزیابی بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات، بیشینه شتاب و بیشینه برش پایه و نرم آنها بهره‌جویی شده است. کنترل بی‌سیم باعث افزایش ۱۷ درصدی در مقدار میانگین معیار

این مطالعه پتانسیل استفاده از ارتباطات بی‌سیم را برای کنترل سازه‌های محک بررسی می‌کند. بر اساس مدل محاسباتی بی‌سیم در سازه، هر دو روش کنترل بی‌سیم و کنترل باسیم برای کنترل یک سازه فولادی ۳ طبقه با میراگر MR در هر طبقه تحت تحریک زلزله‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

بی سیم برش پایه را نیز نسبت به مدل باسیم، کمتر کاهش داده است. کنترل بی سیم میزان بیشینه برش پایه را در سازه ۳ طبقه نسبت به حالت کنترل نشده، ۱۲ درصد کمتر کاهش داده است. کنترل بی سیم باعث افزایش چند برابری میزان نرم تغییر مکان نسبی طبقات، نرم بیشینه شتاب طبقات و نرم بیشینه برش پایه نسبت به مدل کنترل باسیم شده است.

سیاسگزاری

بیشینه جابه جایی نسبی طبقات سازه کنترل شده به سازه کنترل نشده (J1) نسبت به حالت باسیم شده است. در معیار ارزیابی J2 که نشان دهنده بیشینه شتاب طبقات سازه کنترل شده به سازه کنترل نشده است، کنترل بی سیم ۱۳ درصد را نسبت به حالت باسیم به ثبت رسانده است. میانگین بیشینه برش پایه سازه کنترل شده به کنترل نشده (J3) در سازه بی سیم نسبت به سیستم باسیم نیز ۱۵ درصد افزایش یافته است. کنترل بی سیم، میانگین بیشینه جابه جایی نسبی طبقات و میانگین بیشینه شتاب طبقات در سازه را نسبت به سازه کنترل نشده به ترتیب، ۹ و ۱۰ درصد کمتر کاهش داده است. کنترل

مراجع

1. C.-H. Loh et al., "Experimental verification of a wireless sensing and control system for structural control using MR dampers," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 36, no. 10, pp. 1303-1328, 2007.
2. C. R. Farrar, G. Park, D. W. Allen, and M. D. Todd, "Sensor network paradigms for structural health monitoring," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 13, no. 1, pp. 210-225, 2006.
3. J. P. Lynch and K. J. Loh, "A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring," *Shock and vibration digest*, vol. 38, no. 2, pp. 91-130, 2006.
4. Y. Wang, R. A. Swartz, J. P. Lynch, K. H. Law, K.-C. Lu, and C.-H. Loh, "Application of Decentralized Wireless Sensing and Control in Civil Structures," in *US-Taiwan Workshop on Smart Structural Technology for Seismic Hazard Mitigation*, Taipei, Taiwan, 2006.
5. J. P. Lynch and K. H. Law, "Decentralized control techniques for large-scale civil structural systems," in *Proc. of the 20th Int. Modal Analysis Conference (IMAC XX)*, pp. 406-413, February 4, 2002.
6. Z. Sun, B. Li, S. J. Dyke, C. Lu, and L. Linderman, "Benchmark problem in active structural control with wireless sensor network," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 23, no. 1, pp. 20-34, 2016.
7. L. E. Linderman, *Smart wireless control of civil structures*. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2013.
8. A. Y. Fallah and T. Taghikhany, "Time-delayed decentralized H2/LQG controller for cable-stayed bridge under seismic loading," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 20, no. 3, pp. 354-372, 2013.
9. R. A. Swartz and J. P. Lynch, "Strategic network utilization in a wireless structural control system for seismically excited structures," *Journal of structural engineering*, vol. 135, no. 5, pp. 597-608, 2009.
10. Y. Ohtori, R. Christenson, B. Spencer Jr, and S. Dyke, "Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings," *Journal of engineering mechanics*, vol. 130, no. 4, pp. 366-385, 2004.

11. S. J. Dyke, F. Yi, S. Frech, and J. D. Carlson, "Application of Magnetorheological Dampers to Seismically Excited Structures, 361," in *Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference*, vol. 3727, p. 410, March 1999.
12. B. Spencer Jr, S. Dyke, M. Sain, and J. Carlson, "Phenomenological model for magnetorheological dampers," *Journal of engineering mechanics*, vol. 123, no. 3, pp. 230-238, 1997.
13. H. Fazaeli Hosseini Nejad and A. Karamodin, "Semi-active control of three-story benchmark structure using LQG algorithm with a fuzzy-genetic system," *Journal of Structural and Construction Engineering*, vol. 9, no. 5, pp. 107-123, 2022 .(in Persian)

Geometric Nonlinear Dynamic Analysis of MLC Cylindrical Shells with FGM Core under Impact Load using Finite Element Method

Research Note

Mojtaba Shahraki¹, Farzad Shahabian Moghadam² DOI: [10.22067/jfcej.2023.79505.1189](https://doi.org/10.22067/jfcej.2023.79505.1189)

1. Introduction

Functionally Graded Materials (FGMs) are well-known for their high thermal resistance and low thermal stresses. These materials are commonly used in structures that are subjected to impact and thermal shocks. FGMs consist of a pure ceramic layer on one side, which is weak in comparison to other materials, especially metals, due to their low ductility; the feature makes them very susceptible to cracking. Therefore, there is a strong need to increase the ductility of ceramics. Incorporating a resistant coating can lead to better performance. Moreover, the other side of FGMs is made of pure metal, which can be improved by a resistant coating to increase its thermal capacity, corrosion resistance, and surface wear resistance. These resistant coatings are multi-layered composite materials that are placed next to each other but are not soluble in each other. These materials are made up of a polymeric resin (plastic reinforced with coarse molecules) as a base with strings and fibers as the reinforcing agent. Therefore, in this study, multi-layered composite materials were placed on both sides of the FGM core. One of the innovations of this study is the comparative performance analysis of the impact of parameters on the dynamic response of cylindrical shells with MLC-FGM-MLC structure under impact loading. This includes the investigation of the influential impacts of FGM core volumetric power index, types of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) and GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) layers, angles of layer orientation, and the number of layers of composite materials on the shell's response. For this purpose, the shell is modeled as a set of smaller shell elements using the finite element method in Abaqus software, and its nonlinear geometric dynamic behavior is examined by applying the equations governing the deformed elements in each time step.

2. Fundamentals and concepts

In this study, the target shell's core is made of ceramic and metal phases and has a gradual and continuous change of material properties along its thickness. Using the mixing law, material properties such as elasticity modulus, density, and Poisson's ratio vary throughout the variable

thickness. This change in material properties is defined by Equation 1.

$$p(z) = p_c V_c(z) + p_m V_m(z) \quad (1)$$

where p_c and p_m represent the material properties of ceramic and metal phases in FGM, respectively, and $V_c(z)$ and $V_m(z)$ are the volume fractions of ceramic and metal, respectively, which is expressed as follows:

$$V_c(z) + V_m(z) = 1 \quad (2)$$

$$V_c = \left(\frac{2z + h}{2h} \right)^n \quad (3)$$

In these equations, n is the volume power index of volume and h is the thickness of the desired shell.

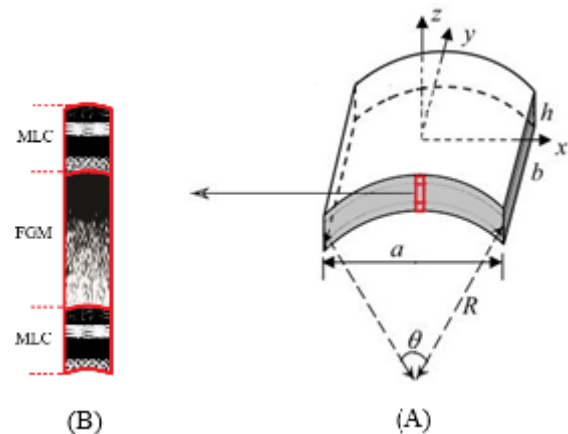


Figure 1. A) geometry and coordinates of the hollow cylindrical shell; B) schematic placement of MLC and FGM layers along the thickness of the shell

The shell has dimensions $a=b=1$ (Figure 1) and simple boundary conditions at the four edges of the shell (Figure 1). A Frenier impact is applied to the outer surface of the cylindrical shell according to Equation 4. The studied cylindrical shell is composed of composite and functionally graded materials, and the materials used in the

*Manuscript received: November 8, 2022, Revised, February 20, 2023, Accepted, May 14, 2023.

1. PhD Candidate, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2. Corresponding author. Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: shahabf@um.ac.ir

shell's skin and core are represented as inner skin/core/outer skin. Therefore, for examining the influential parameters, four different cases of CFC, CFG, GFC, and CFG are considered, where CFC stands for CFRP/FGM/CFRP, CFG stands for CFRP/FGM/GFRP, GFC stands for GFRP/FGM/CFRP, and GFG stands for GFRP/FGM/GFRP.

$$\begin{aligned}
 P(x, y, t) &= P_0 P_t(t) P_s(x, y) \\
 P_0 &= 100 \text{ kPa} \\
 P_s(x, y) &= 1.0 \\
 P_t(t) &= \begin{cases} \left(1 - \frac{t}{t_p}\right) e^{-\frac{\alpha t}{t_p}} & t \leq t_p \\ 0 & t > t_p \end{cases}
 \end{aligned} \quad (4)$$

Here P_0 is the maximum pressure during loading time, $P_t(t)$ is the pressure distribution over time range, and P_s is the pressure distribution on the shell surface, α is the wave shape parameter, t is the elapsed time, and t_p is the loading time considered for $t_p=20\text{ms}$, $\alpha=2$ in this study.

The type of material mixture for FGM is selected as metal-ceramic (aluminum-silicon carbide). Table 1 presents the mechanical properties of these materials such as Young's modulus, density, and Poisson's ratio. The upper and lower MLC surfaces of the shells are made of composite materials GFRP and CFRP. Table 2 shows their mechanical specifications.

Table 1. Mechanical properties of FGM materials

Mechanical properties	Young's modulus (GPa)	Density (kg/m ³)	Poisson's ratio
Aluminum	67	2702	0.33
Silicon Carbide	302	3100	0.17

Table 2. Mechanical properties of composite materials

Mechanical properties	CFRP	GFRP
Density (kg/m ³)	1572	2301
E_x (GPa)	121	46.3
E_y (GPa)	14	11.6
E_z (GPa)	14	11.6
G_{xy} (GPa)	5.05	4.28
G_{yz} (GPa)	5.02	4.18
G_{xz} (GPa)	5.05	4.28
ν_{xy}	0.17	0.25
ν_{yz}	0.40	0.39
ν_{xz}	0.020	0.062

3. Examined parameters

First, the impact of the volume power index of the FGM material in the core of the shell was examined. For this purpose, seven volume power indices ($n = 0.0, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, \infty$) with a curvature of 0.25 (4-meter radius) were modeled under impact loading. The multilayer composite surfaces on both sides of the FGM core were arranged in four layers and with angles of $45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ$. Next, the placement of monolayers in the

multilayer composite surfaces was examined and five angles ($\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$) were analyzed. Shells with a curvature of 0.25, 12 mm thickness, and FGM core with volume power index $n=1$ were modeled under impact loading. Finally, the impact of the number of layers in the composite surfaces of the shell was examined, and models with 4, 8, 12, 16, and 32 layers were modeled under impact loading. In this study, a curvature of 0.25 and layering of $-45^\circ/90^\circ/45^\circ/0^\circ$ for every 4 layers in the composite surfaces of the shell and volume power index $n=1$ for the FGM core were considered.

4. Conclusion

The effective factors of composite cylindrical shells with FGM core, including the volumetric power index, different angles of fiber placement in the composite materials, and the number of composite layers, were investigated. The results of comparing and evaluating the dynamic behavior of the shells are summarized as follows.

- Nonlinear geometric displacement is more significant than linear displacement at the center of the shell, and with the increase of the volumetric power index, the amount of displacement at the center of the shell has increased. The maximum displacement occurred in the all-metallic shell ($n=\infty$), and the minimum displacement occurred in the all-ceramic shell ($n=0$), and the response of other shells was between the two states. Moreover, in the CFC and GFG states, the shell has the least and most displacements, respectively;
- By examining the arrangement of monolayers, it was observed that selecting $\theta=15^\circ$ will cause the minimum displacement in the shell, and selecting $\theta=60^\circ$ will cause the maximum displacement in the shell;
- Examining the impact of the number of multilayer composite layers on the upper and lower surfaces of the shell showed that when the number of layers increases the maximum displacement at the center of the shell decreases.



تحلیل دینامیکی غیرخطی هندسی پوسته‌های استوانه‌ای MLC با هسته FGM تحت بار ضربه با استفاده از روش اجزای محدود*

یادداشت پژوهشی

مجتبی شهرکی^(۱) فرزاد شهابیان مقدم^(۲) 

DOI: 10.22067/jfpei.2023.79505.1189

چکیده شناخت رفتار تغییرشکل‌های بزرگ پوسته‌های استوانه‌ای مرکب چندلایه (MLC) با هسته مواد هدفمند (FGM) که دارای ضخامت کم هستند در برابر بارهای ضربه‌ای، مهم می‌باشد. در این پژوهش به بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای اثرگذار (شاخص توان حجمی مواد هدفمند، نحوه قرارگیری لایه‌ها و تعداد لایه‌های مواد مرکب) بر روی پاسخ دینامیکی پوسته مورد نظر تحت بار ضربه پرداخته می‌شود. تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی هندسی پوسته استوانه‌ای به روش المان محدود توسط مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است و اثر شاخص توان حجمی هسته FGM و پارامترهای اثرگذار مواد مرکب چندلایه همچون نوع لایه‌ها شامل پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP) و پلیمر تقویت شده با الیاف کربن (CFRP)، زوایه قرارگیری لایه‌ها و تعداد لایه‌ها مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش شاخص توان حجمی، مقدار تغییر مکان پوسته کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که بیشینه تغییر مکان در پوسته CFRP/FGM/CFRP با هسته تمام فلزی و کمینه تغییر مکان در پوسته GFRP/FGM/GFRP با هسته تمام سرامیکی اتفاق می‌افتد. بررسی حالت‌های مختلف قرارگیری لایه‌ها نشان می‌دهد که انتخاب زوایه قرارگیری ۱۵ درجه، موجب وقوع تغییر مکان کمتری می‌گردد و همچنین با افزایش تعداد لایه‌ها، کاهش تغییر مکان مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی مواد مرکب چندلایه، مواد هدفمند، پوسته استوانه‌ای، تحلیل دینامیکی غیرخطی هندسی، بار ضربه.

Geometric Nonlinear Dynamic Analysis of MLC Cylindrical Shells with FGM Core under Impact Load using by Finite Element Method

Mojtaba Shahraki

Farzad Shahabian Moghadam

Abstract In recent decades, shells made of composite materials have been used in modern structures under impact load. Multi-Layer Composites (MLC) and Functionally Graded Materials (FGMs) are the upgrades of composites that have been considered due to their suitable mechanical properties such as high resistance to weight ratio, flexibility and impact resistance. In this research, geometric nonlinear dynamic behavior on multilayer composite cylindrical shells with FGM core under impact load has been analyzed; because it is necessary to know how structures made of these materials behave under such loads. For this purpose, the effect of FGM core volume fraction index and the effective parameters of multi-layer composites such as the angles of the layers and the number of layers have been investigated. The results of this study show that by increasing the volume fraction index, the maximum displacement of the shell decreases. The maximum displacement occurs in the CFC (CFRP/FGM/CFRP) shell with pure metal FGM and the minimum displacement occurs in the GFG shell with pure ceramic FGM. Evaluation of the different positions of the layers shows that selecting a 15-degree positioning angle causes less displacement and also decreases the displacement as the number of layers increases.

Keywords Multi-Layer Composites (MLC), Functionally Graded Material (FGM), Cylindrical Shell, Geometric nonlinear dynamic analysis, Impact Load.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۸/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۲/۲۴ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: استاد گروه مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. Email: shahabf@um.ac.ir

مقدمه

پوسته‌های ساخته شده از مواد مرکب کاربردهای متنوعی دارند. این پوسته‌ها معمولاً در صنایع فضایی، نظامی، حمل و نقل و ساخت و سازهای عمرانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. پوسته‌ها دارای ضخامت کم و سطحی گسترده هستند و زمانی که در معرض بارهای ضربه‌ای قرار می‌گیرند دچار تغییر شکل‌های زیادی می‌گردند.

امروزه مواد هدفمند به عنوان موادی با مقاومت حرارتی بالا و تنش‌های حرارتی پایین شهرت یافته‌اند. کاربرد این مواد در سازه‌هایی که تحت ضربه و شوک‌های حرارتی قرار می‌گیرند، مرسوم است. بور و دیوز [1] با الهام از نحوه ساخت مواد مرکب گرادینانی که خواص مکانیکی آنها در راستای مورد نظر با شیب ملایمی تغییر می‌کند، ایده‌ای را برای استفاده از تغییرات تدریجی و پیوسته در مواد ارائه دادند. پس از آن، یک تحقیق گسترده در زمینه مواد با تغییر عملکرد تدریجی به وسیله کوزومی و همکاران [2] در آزمایشگاه هوافضای ژاپن برای تولید مواد مقاوم در برابر حرارت آغاز شد که با ساخت پوسته FGM (Functionally Graded Material) کروی برای نوک موشک اتمام یافت. هورگان و چان [3] به بررسی اثرات ناهمگنی مواد (FGM) بر پاسخ استوانه‌ها و دیسک‌های دایره‌ای توخالی همسانگرد خطی الاستیک پرداختند که تحت فشار داخلی یا خارجی یکنواخت می‌باشند. بدین منظور، معادله‌های حاکم را در حالت کرنش صفحه‌ای با توزیع توانی ضریب کشسانی در راستای شعاعی به کمک معادله‌های لامه استخراج کردند و مشاهده شد که تنش‌های ایجاد شده در استوانه و دیسک FGM به طور قابل توجهی با حالت همگن متفاوت است. به عنوان مثال، حداکثر تنش حلقه‌ها، برخلاف مواد همگن، بر روی سطح داخلی رخ نمی‌دهد.

اگرچه تاکنون تحقیقات فراوانی در زمینه ضربه بر روی صفحات مرکب انجام شده است، لیکن اثر ضربه بر روی پوسته‌های استوانه‌ای مرکب کمتر مورد توجه قرار گرفته است. توتونسو و ازترک [4] رفتار سازه‌های گرادینانی و مشخص کردن روش‌های تحلیلی برای بررسی تنش‌ها در وسایل شکست‌پذیر را مورد بررسی قرار داده و با استفاده از روش تحلیلی، روابط دقیقی برای تنش‌ها در سازه‌های فشاری گرادینانی ارائه کرده‌اند که ویژگی و نوآوری بارز این کار محسوب می‌شود. از طرفی دیگر محدودیت در مدل‌سازی سازه‌های گرادینانی و عدم در

نظر گرفتن عوامل بیرونی مانند حرارت و فشار در مدل‌سازی تنش‌ها از ضعف‌های این کار می‌باشد. در این مقاله، از تابعی برای توزیع متغیرهای مکانیکی در سازه استفاده شده است که به صورت خطی و صعودی تغییر می‌کند و نتایج نشان می‌دهند که تنش‌های پایه در سازه‌های فشاری گرادینانی به شدت تحت تأثیر قرار گرفته و با تغییرات در پارامترهای سازه مانند شیب گرادینان، توزیع تنش در سازه نیز تغییر می‌کند. صیدی [5] به تحلیل کمانشی سازه‌های مخروطی شکل ساندویچی با رویه‌های مواد تابعی هدفمند پرداختند که از یک روش تحلیلی با تئوری مرتبه بالاتر بهبود یافته شده بهره جستند. از قدرت این مقاله می‌توان به دقت بالای نتایج به دست آمده و استفاده از تئوری با دقت بالاتر بهبود یافته برای بررسی رفتار پوسته‌های ساندویچی با رویه‌های مواد تابعی هدفمند اشاره نمود و از طرفی عدم ارائه مقایسه نتایج با روش‌های موجود در این زمینه می‌تواند به عنوان یک ضعف در این مقاله مطرح شود. نتایج این مقاله نشان می‌دهند که رفتار پوسته‌های ساندویچی با رویه‌های مواد تابعی هدفمند به شدت تحت تأثیر پارامترهای مختلف مانند ضخامت، نسبت شعاع کف و بالا، توزیع تنش در پوسته می‌باشد.

شینمن و گریف [6] به بررسی تحلیل دینامیکی پوسته‌های دو لایه از جنس کامپوزیت با شکل‌دهی با استفاده از تئوری هوگرن-لوکاس-کرکهایمر (Hogben-Lucas-Krecker) (HLK) پرداختند. این تئوری، به عنوان یکی از تئوری‌های پیشرفته محاسباتی، قابلیت استفاده در بررسی رفتار دینامیکی پوسته‌های کامپوزیتی را داراست. در این مقاله، نویسندگان با استفاده از روش المان محدود و تئوری HLK، برای پوسته‌های دو لایه از جنس کامپوزیت، نتایج تحلیلی را ارائه داده‌اند که به دلیل استفاده از روش تحلیلی دقیق و تئوری پیشرفته، قابل توجه است و می‌تواند به عنوان یکی از منابع مفید برای بررسی رفتار دینامیکی پوسته‌های کامپوزیتی با شکل‌دهی لایه‌ای دو لایه، استفاده شود. با این حال، ضعف این مقاله می‌تواند شامل عدم مطالعه تأثیر اثرات ترک‌ها و شکستگی‌ها بر رفتار دینامیکی پوسته باشد. همچنین، این مقاله تنها به پوسته‌های دو لایه از جنس کامپوزیت پرداخته است و به بررسی پوسته‌های با لایه‌های بیشتر و یا با جنس‌های متفاوت، پرداخته نشده است و در آخر نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویه برشی و شعاع

نرم افزار آنالیز المان محدود آباکوس باعث افزایش دقت و دقت تحلیل شده است و از طرفی ضعف این مطالعه این است که آزمایش ها فقط بر روی نمونه های خاصی از فیبر فلز لامینه شده انجام شده و ممکن است به نتایجی که در سایر شرایط یا با استفاده از مواد مختلف به دست می آید، نیازمند بازبینی باشد و در آخر، نتایج نشان داد که ترک های شکست در پوسته فلزی باعث خرابی فیبر شده و به شکل خطی در آنها گسترش می یابد، افزایش سختی فلز داخلی موجب کاهش رشد ترک می شود و با افزایش ضخامت فلز داخلی، رفتار رشد ترک تغییر کمی می کند. همچنین نتایج آزمایش نشان داد که میزان رشد ترک در لایه فلزی بیشتر از لایه فیبری است.

کریستوفرو و همکاران [9,10] خرابی ناشی از ضربه به بافت کربن/اپوکسی در شکل سیلندری مورد بررسی قرار دادند. نوآوری این کار در استفاده از مدل سازی المان محدود برای تحلیل خرابی ضربه در این بافت بوده است. برای بررسی خرابی ضربه در بافت کربن/اپوکسی، از مدل سازی المان محدود با استفاده از نرم افزار ANSYS استفاده شده است و تأثیر پارامترهای مختلفی مانند سرعت ضربه، شکل سطح ضربه و زاویه ضربه بر خرابی مورد بررسی قرار گرفته است. قدرت این کار در استفاده از مدل سازی المان محدود در بررسی خرابی ضربه در بافت کربن/اپوکسی است که می تواند در طراحی سازه های سبک و مقاوم استفاده شود و از سوی دیگر، ضعف این کار می تواند مربوط به محدودیت در انجام آزمایش های عملی باشد. همچنین، مدل سازی المان محدود نیازمند دقت در مشخص کردن شرایط مرزی و پارامترهای ورودی است و در آخر، نتایج نشان می دهد که شکل سطح ضربه و زاویه ضربه بر خرابی تأثیر به سزایی دارند و خرابی بیشتر در محدوده سطح ضربه ایجاد می شود. همچنین، سرعت ضربه نیز تأثیر زیادی بر روی خرابی دارد. کومار و همکاران [11] به بررسی تأثیر پارامترهای مختلفی مانند خصوصیات لمینت، ساختار توده ای و نحوه برخورد بر روی پاسخ ضربه و خسارت در لمینت های کامپوزیتی خمیده می پردازند. نوآوری این کار در بررسی تأثیر شکل خمیدگی و پارامترهای برخورد بر روی پاسخ ضربه و خسارت در لمینت های کامپوزیتی خمیده است. قدرت این پژوهش، استفاده از تحلیل عددی و آزمایش های عملی به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف، به عنوان یک روش تحقیقی

پوسته، تنش های اصلی در پوسته افزایش می یابند و همچنین، با افزایش بار انتقالی، نقطه شکست پوسته به طور قابل توجهی کاهش می یابد.

رامکومار و ثاکار [7] پوسته های چندلایه دارای انحنا را تحت اثر بار ضربه ای تحلیل کردند این کار در حوزه مواد مرکب و بهبود عملکرد سازه های مرکب از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این مقاله، از یک روش تحلیلی برای برآورد پاسخ دینامیکی پوسته استفاده شده است و تأثیر پارامترهای مختلفی مانند ضخامت، شکل و جنس لایه ها بر روی پاسخ دینامیکی بررسی شده است.

نوآوری این مقاله، استفاده از یک روش تحلیلی برای برآورد پاسخ دینامیکی پوسته های چندلایه دارای انحنا تحت ضربه با سرعت پایین است. علاوه بر این، بررسی تأثیر پارامترهای مختلفی مانند ضخامت، شکل و جنس لایه ها بر روی پاسخ دینامیکی نیز از دیگر نوآوری های این مقاله است. در نهایت، نتایج به دست آمده از این تحقیق، نشان می دهد که برخی پارامترهای مانند ضخامت و جنس لایه ها می توانند تأثیر مهمی بر روی پاسخ دینامیکی پوسته های چندلایه دارای انحنا تحت ضربه با سرعت پایین داشته باشند. به علاوه، این پژوهش به نشان دادن تأثیر طرح لایه بندی بر روی پاسخ دینامیکی صفحات لامینه ای نیز می پردازد. ضعف این مطالعه، محدودیت در استفاده از روش تحلیلی مورد استفاده است که ممکن است برای برآورد پاسخ دینامیکی بعضی از سازه های مرکب به خصوص در شرایط مختلف، دقت کافی را نداشته باشد.

جانسون و هاموند [8] به بررسی رفتار رشد ترک داخلی پلی های تیتانیوم (Ti) در لایه های داخلی یک لامینه فایبر-فلز (Fiber Metal Laminate) با استفاده از روش های آزمایشگاهی پرداختند. یکی از ویژگی های نوآورانه این پژوهش، انجام آزمایش های ترکی بر روی پلی های تیتانیوم داخلی لامینه فایبر-فلز بوده است که پیش تر در تحقیقات بسیار کمی مورد بررسی قرار گرفته بود. برای انجام این پژوهش، ابتدا نمونه های آزمایشی ساخته شده و سپس با استفاده از روش آزمایش ترکی، رفتار رشد ترک در پلی های تیتانیوم داخلی بررسی شده است. قدرت این پژوهش در بررسی دقیق و اصولی رفتار شکست و رشد ترک در فیبر فلز لامینه شده با استفاده از تحلیل ترموشعاعی و آزمون کرنش فیلم است. همچنین، استفاده از

کارآمد، می‌باشد و از طرف دیگر، ضعف این کار نیز می‌تواند عدم در نظر گرفتن برخی پارامترهای مهم مانند اثرات پیشرونده، تغییر شکل‌های پلاستیکی و تغییر شکل‌های شکستی در تحلیل عددی و آزمایش‌های عملی باشد. نتایج حاصل از تحلیل‌ها و آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تغییر در خصوصیات لمینت، شکل خمیدگی و پارامترهای برخورد، تأثیر بسیاری بر روی پاسخ ضربه و خسارت در لمینت دارد.

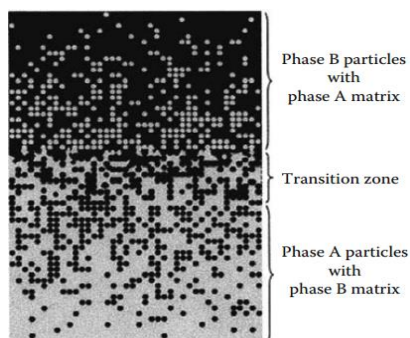
هر و همکاران [12] از روش المان محدود برای بررسی رفتار سازه‌های لایه‌ای کامپوزیتی و پوسته‌ای در برابر ضربه‌های کم سرعت استفاده کرده‌اند. نوآوری این پژوهش ارائه روش المان محدود برای شبیه‌سازی ضربه‌های کم سرعت بر روی سازه‌های لایه‌ای کامپوزیتی و پوسته‌ای است که از المان‌های سه بعدی برای مدل‌سازی سازه‌های لایه‌ای استفاده شده است. در روش تحقیق، نویسندگان ابتدا رفتار آزمایشی سازه‌های لایه‌ای کامپوزیتی و پوسته‌ای را بررسی کرده و سپس مدل المان محدود را برای شبیه‌سازی رفتار آنها توسعه داده‌اند و سپس با استفاده از این مدل المان محدود، بررسی شده است که نحوه قرارگیری لایه‌های کامپوزیتی و پوسته‌ای در سازه، تأثیر بسیار زیادی بر روی رفتار سازه در برابر ضربه‌های کم سرعت دارد. از قوت‌های این پژوهش، استفاده از روش المان محدود برای تحلیل واکنش محیطی این نوع مواد است. همچنین، نتایج تجربی و مقایسه آن با نتایج تحلیلی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در این مقاله، توانایی بالایی در توصیف واکنش محیطی مواد مرکب دارد و از سوی دیگر، ضعف احتمالی این مقاله ممکن است به دلیل نبود تجربه عملی محاسبات باشد که می‌تواند از دقت و اعتبار نتایج تحلیلی کاسته شود. همچنین، محدودیت‌هایی مانند تأثیرات دما، رطوبت و سایر پارامترهای محیطی در نظر گرفته نشده است که می‌تواند به ناهمخوانی بین نتایج تحلیلی و تجربی منجر شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رفتار سازه‌های لایه‌ای کامپوزیتی و پوسته‌ای در برابر ضربه‌های کم سرعت به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد و ترک‌ها و خراش‌های جدی در سطح سازه ایجاد می‌شود. همچنین، ملاحظه شد که روش قرارگیری لایه‌های کامپوزیتی و پوسته‌ای در سازه، تأثیر زیادی بر روی رفتار سازه در برابر ضربه‌های کم سرعت دارد.

ساختارهای ساندویچی FML/Core/FML عبارتند از دو رویه (Fiber Multi-layer) FML که در بالا و پایین هسته واقع شده‌اند. رویه‌های FML می‌توانند از مواد فلزی مانند آلومینیم، فولاد، مس و تیتانیوم به همراه الیاف از نوع شیشه، کولار و کربن ساخته شوند. هسته می‌تواند از جنس فوم (از نوع متخلخل و یا متراکم) و یا ماده FGM باشد [13]. هاجینسون و هی [14] به بررسی رفتار بالقوه برای پوسته‌های فوم فلزی با هسته فوم فلزی پرداختند. برای این منظور از روش المان محدود استفاده شده است تا رفتار مکانیکی پوسته‌های فوم فلزی با هسته فوم فلزی را برای بارگذاری‌های محوری و فشاری بررسی کنند. قدرت این پژوهش این است که به دلیل اینکه در پژوهش‌های قبلی بررسی نشده بود، می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای تحلیل‌ها در نظر گرفته شود اما ضعف این مطالعه این است که تنها رفتار پوسته‌های فوم فلزی با هسته فوم فلزی بررسی شده است و تأثیر پارامترهای دیگری مانند جنس پوسته و هسته بر رفتار پوسته‌های فوم فلزی در برابر بارگذاری ناشی از فشار مؤثر بررسی نشده است. به علاوه، رفتار پوسته‌های فوم فلزی با هسته فوم پلیمری مورد مطالعه قرار نگرفته است و نتایج نشان می‌دهد که پوسته فوم فلزی با هسته فوم فلزی در مقایسه با پوسته فوم پلیمری با هسته فوم فلزی، عملکرد بسیار بهتری در برابر فشار مؤثر دارد. همچنین، این مطالعه نشان داد که با افزایش ضخامت پوسته، باربری مؤثر پوسته فوم فلزی با هسته فوم فلزی افزایش می‌یابد. گارگ و همکاران [15] به طراحی و تحلیل سازه‌های مرکب، به‌ویژه پوسته‌های کامپوزیتی و ساندویچی، متمرکز شدند. در این پژوهش، روش‌های بسته بالاتر برای حل مسئله ارتعاش آزاد پوسته‌های کامپوزیتی و ساندویچی ارائه شده است. این روش‌ها بر اساس تئوری لایه‌ای پوسته و با در نظر گرفتن تأثیر تغییرات ضخامت و جهت المان‌ها به کار گرفته شده‌اند. استفاده از روش‌های بسته بالاتر برای حل مسئله‌های پوسته‌های کامپوزیتی و ساندویچی، مزیت‌هایی مانند دقت بیشتر و سرعت حل بیشتر را به دنبال دارد. همچنین، در این مقاله به عنوان یک نوآوری، تأثیر ضخامت و جهت المان‌ها بر رفتار ارتعاشی پوسته‌های کامپوزیتی و ساندویچی مورد بررسی قرار گرفته است. از طرف دیگر، ضعف این پژوهش ممکن است شامل محدودیت در نوع سازه‌های مورد مطالعه و انجام آزمایش بر روی آنها باشد.

شود. همچنین، پوسته‌ها به دلیل سطح گسترده و ضخامت کم اغلب در برابر بارهای ضربه‌ای دچار تغییر مکان زیادی می‌شوند. براساس جستجوهای انجام شده، تاکنون کمتر به بحث ضربه روی پوسته‌های استوانه‌ای MLC با هسته FGM پرداخته شده است. لذا از جمله نوآوری‌ها و ویژگی‌های این پژوهش، بررسی عملکرد مقایسه‌ای پارامترهای اثرگذار بر پاسخ دینامیکی پوسته استوانه‌ای با ساختار MLC-FGM-MLC تحت بار ضربه عنوان نمود که شامل بررسی تأثیرگذاری شاخص توان حجمی هسته FGM، نوع لایه‌ها CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) و GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic)، زوایای قرارگیری لایه‌ها و تعداد لایه‌های مواد مرکب چندلایه، بر روی پاسخ پوسته می‌باشد. برای این کار، با استفاده از روش المان محدود، پوسته به عنوان یک مجموعه از المان‌های پوسته‌ای کوچک‌تر در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی می‌شود و رفتار دینامیکی غیرخطی هندسی آن با استفاده از معادلات حاکم بر المان‌های تغییر شکل یافته شده در هر گام زمانی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مبانی و مفاهیم پایه

مواد هدفمند گونه‌ای از مواد مرکب هستند که در سال‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. خواص مکانیکی این مواد به‌طور پیوسته از یک سطح به سطح دیگر تغییر می‌کند و این تغییرات به وسیله تغییر تدریجی نسبت حجمی مواد تشکیل دهنده آنها ایجاد می‌شود. قابل توجه است که به علت تغییرات پیوسته خواص مکانیکی، مشکلات عدم پیوستگی که در ساختارهای مرکب موجود است در مواد هدفمند به وجود نمی‌آید. در شکل (۱) نمای شماتیک یک ساختار هدفمند متشکل از دو ماده A و B نشان داده شده است.



شکل ۱ نمایش شماتیک ماده FGM تشکیل شده از دو فاز A و B [17]

همچنین، محدودیت‌هایی مانند عدم نظر گرفتن تأثیر شکل هندسی و تغییرات دما بر رفتار سازه‌ها نیز می‌تواند به عنوان ضعف مطرح شود.

رحمانی و همکاران [16] به بررسی و پژوهش پاسخ لرزشی یک پوسته استوانه‌ای با هسته انعطاف‌پذیر می‌پردازد. در این پژوهش، از روش المان محدود برای مدل‌سازی پوسته و هسته استفاده شده است و نتایج به دست آمده با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. نوآوری این پژوهش، استفاده از یک هسته انعطاف‌پذیر در ساختار پوسته‌ای استوانه‌ای است. بدین منظور ابتدا مدل المان محدود پوسته‌ای استوانه‌ای با هسته انعطاف‌پذیر ساخته شده و پس از آن پاسخ لرزشی سازه با استفاده از روش المان محدود به دست آمده است. در انتها، نتایج به دست آمده با نتایج تجربی مقایسه و تحلیل شده‌اند. قدرت این پژوهش در بررسی تأثیر هسته انعطاف‌پذیر در پوسته‌های استوانه‌ای است که می‌تواند بهبود خواص لرزشی و استحکام سازه را فراهم کند، اما ضعف آن مربوط به محدودیت در بررسی تأثیر مختصات هسته بر خواص سازه است و در آخر نتایج پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از هسته انعطاف‌پذیر در پوسته‌های استوانه‌ای می‌تواند خواص لرزشی و استحکام سازه را بهبود بخشد.

مواد FGM در یک سطح خود دارای سرامیک خالص می‌باشند که نقطه ضعف سرامیک‌ها در مقایسه با دیگر مواد به ویژه فلزات، چقرمگی پایین آنها است که در عمل این مواد را در برابر ترک بسیار حساس کرده است. بنابراین نیاز شدیدی به افزایش چقرمگی سرامیک‌ها احساس می‌شود. لذا گنجاندن رویه‌ای مقاوم می‌تواند عملکرد بهتری را منجر شود. از طرفی سطح دیگر مواد FGM فلز خالص بوده که به منظور بهبود خواص آن می‌توان از رویه‌ای مقاوم بهره جست تا ظرفیت گرمایی، مقاومت به خوردگی و سایش سطح فلزی را افزایش دهد. این رویه‌های مقاوم به صورت مواد مرکب چند لایه می‌باشند، متشکل از چند لایه بوده که در کنار هم قرار گرفته‌اند ولی در عین حال قابل حل در یکدیگر نیستند این مواد از یک رزین پلیمری (پلاستیک تقویت شده با مولکول‌های درشت) به عنوان زمینه با رشته‌ها و الیافی به عنوان عامل تقویت‌کننده تشکیل می‌شوند. از این رو، در این پژوهش در دو طرف هسته FGM مواد مرکب چندلایه قرار داده شد و رفتار دینامیکی غیرخطی هندسی این نوع سازه‌ها مورد تحلیل قرار گرفته می‌-

در این رابطه n شاخص توان حجمی، h ضخامت پوسته مورد نظر می‌باشد. در پژوهش حاضر، در فرآیند تحلیل هفت مقدار مختلف برای شاخص توان حجمی ($n=0.0, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, \infty$) در نظر گرفته شده است که دو مقدار صفر و بی‌نهایت به ترتیب به صفحه کاملاً سرامیکی و صفحه کاملاً فلزی مربوط می‌شود. تغییرات تابع توان حجمی $(z/h+0.5)^n$ ، در راستای ضخامت صفحه (h) برای مقدارهای مختلف n در شکل (۲) نشان داده شده است.

سیستم مختصات کارتزین (x, y, z) پوسته استوانه‌ای MLC با هسته FGM در سطح میانی پوسته قرار می‌گیرد. محور z در راستای ضخامت پوسته و رو به سمت بالا مثبت در نظر گرفته می‌شود و محور y عمود بر محور x در سطح میانی پوسته قرار می‌گیرد (شکل ۳). تغییر مکان پوسته در راستای ضخامت پوسته با حرف w نشان داده می‌شود.

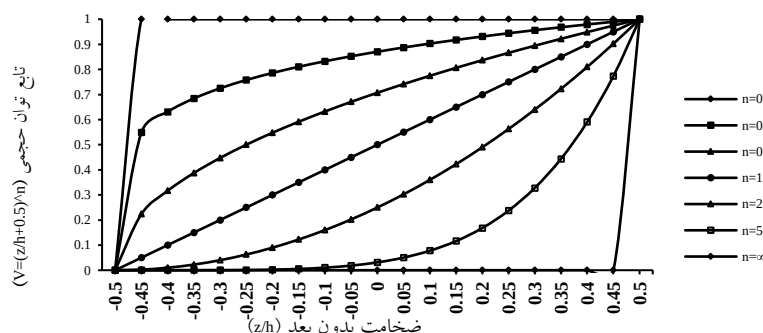
در این پژوهش پوسته هدفمند ساخته شده از فازهای سرامیک و فلز، دارای تغییری تدریجی و پیوسته از خواص مواد در راستای ضخامت خود باشد. با استفاده از قانون اختلاط، خواص مواد هم‌چون ضریب کشسانی، چگالی و نسبت پواسون در سراسر ضخامت متغیر است. این تغییر خواص به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$p(z) = p_c V_c(z) + p_m V_m(z) \quad (1)$$

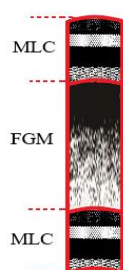
که در آن، p_c و p_m به ترتیب بیانگر خواص مواد فازهای سرامیکی و فلزی FGM می‌باشد و $V_c(z)$ و $V_m(z)$ به ترتیب تابع حجمی سرامیک و فلز می‌باشند که به صورت زیر بیان می‌گردد [18-19].

$$V_c(z) + V_m(z) = 1 \quad (2)$$

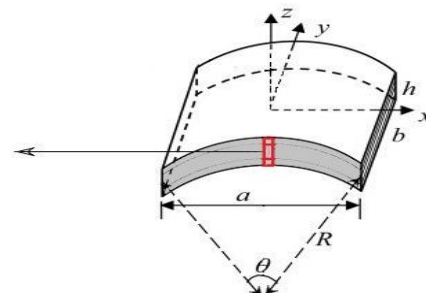
$$V_c = \left(\frac{2z + h}{2h} \right)^n \quad (3)$$



شکل ۲ تغییرات تابع شاخص توان حجمی $(z/h+0.5)^n$



ب



الف

شکل ۳ الف) هندسه و مختصات کارتزین پوسته استوانه‌ای توخالی ب) شماتیک قرارگیری لایه‌های FGM و MLC در راستای ضخامت پوسته

راستی آزمایی

به منظور راستی آزمایی نحوه مدل سازی پوسته استوانه ای FGM و پوسته MLC تحت بار ضربه در نرم افزار اجزای محدود آباکوس، از نتایج عددی پژوهش انجام شده توسط حاج لویی (Hajlaoui) و همکاران [19] برای صحت سنجی پوسته های استوانه ای FGM و از پژوهش هوفت و همکاران [20] برای صحت سنجی پوسته های چند لایه تحت ضربه استفاده شده است.

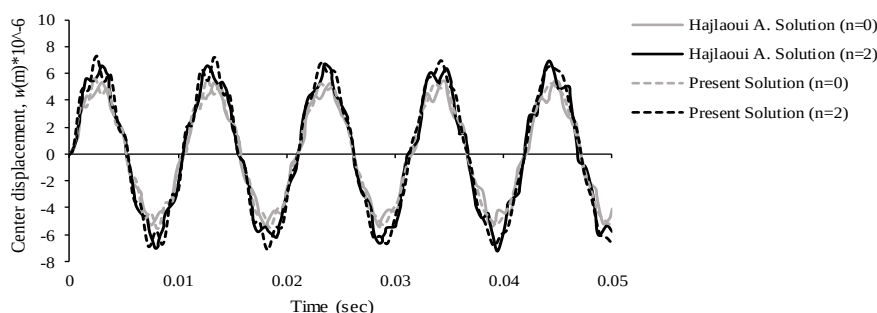
حاج لویی و همکاران به بررسی عددی پاسخ دینامیکی غیرخطی پوسته های استوانه ای توخالی FGM که سطح کل پوسته تحت فشار یکنواخت $q(t)=1500\sin(600t)$ می باشد، پرداختند. این پوسته با ابعاد $L/R=80$, $R/h=500$ (که R شعاع، h ضخامت و L طول پوسته می باشد) و دارای تکیه گاه ساده با دو شاخص توان حجمی $(n=0, 2)$ در ۱۰ لایه مدل سازی گردید. خواص مکانیکی مواد در جدول (۱) آورده شده است. شرایط مرزی در چهار لبه پوسته به صورت مفصلی می باشد و از اثر استهلاک و میرایی صرف نظر شده است. تحلیل دینامیکی غیرخطی هندسی با گام زمانی $\Delta t = 0.01T$ انجام شده است که T دروه تناوب طبیعی سازه می باشد. در این پژوهش، نتایج عددی مرجع [19] با استفاده از نرم افزار آباکوس راستی آزمایی شد که المان پوسته چهار گرهی SR4 با ۲۴ درجه آزادی برای تحلیل در نرم افزار آباکوس انتخاب شده است. در شکل (۴)

تاریخچه زمانی تغییر مکان مرکز پوسته توخالی و در جدول (۲) بیشینه تغییر مکان مرکز پوسته توخالی برای دو مقدار توان حجمی نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود، نتایج مدل سازی دارای دقت قابل قبولی در مقایسه با مقادیرهای گزارش شده حاصل از مرجع [19] است.

در پژوهشی دیگر هوفت و همکاران [20] یک پوسته تک-لایه دو انحنایی از مواد مرکب با مشخصات $h = 2.5\text{mm}$ (ضخامت)، $R_1 = R_2 = 396\text{mm}$ (شعاع انحنا)، $\psi_0 = \theta_0 = 40^\circ$ (زاویه داخلی) را تحت اثر بار ضربه ای به معادله $P(t) = P_0 e^{-t/\tau}$ که در آن $P_0 = 0.9\text{MPa}$ و $\tau = 1\text{ms}$ می باشد، تحلیل کرده اند. در شکل (۵) هندسه این پوسته نشان داده شده است. شرایط مرزی در این مسئله به صورت مفصلی در نظر گرفته شده است و از اثر میرایی صرف نظر شده است. خصوصیات ماده در جدول (۳) نشان داده شده است. در شکل (۶) و جدول (۴) نتایج حاصل از حل عددی مرجع [20] با نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر توسط نرم افزار آباکوس نشان داده شده است. برای مدل سازی مسئله مورد نظر در نرم افزار آباکوس از المان پوسته چهار گرهی SR4 با ۲۴ درجه آزادی استفاده شده است. همان طور که مشاهده می شود نتایج نرم افزار دارای دقت قابل قبولی در مقایسه با مقادیر مرجع [20] می باشد.

جدول ۱ خواص مکانیکی پوسته FGM [19]

نسبت پواسون	چگالی (kg/m^3)	ضریب کشسانی (GPa)	نوع مواد
۰/۲۹۸۱	۴۴۲۹	۱۰۵/۶۹۶۰	تیتانیوم (فلز)
۰/۲۹۸۰	۵۷۰۰	۱۵۴/۳۲۱۱	زیرکونیا (سرامیک)

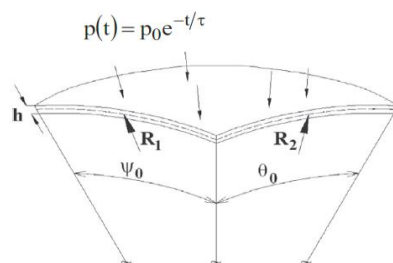


شکل ۴ مقایسه بین تاریخچه زمانی تغییر مکان مرکز پوسته استوانه ای توخالی FGM حاصل از نرم افزار آباکوس و مرجع [19]

جدول ۲ مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس و مرجع [19]

شاخص توان حجمی	نرم‌افزار آباکوس	مرجع [19]	درصد خطا (%)
۰	-۵/۵۱۸	-۵/۴۵۸	۱/۰۹
۲	-۷/۱۹۳	-۷/۲۰۴	۰/۱۵

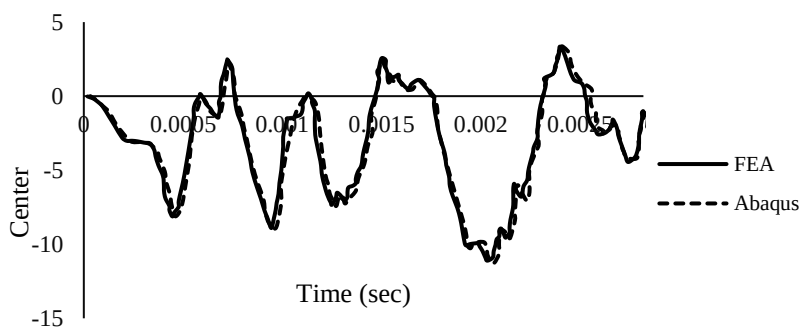
بیشینه تغییر مکان مرکز پوسته (mm)



شکل ۵ هندسه پوسته دو انحنایی [20]

جدول ۳ خواص مکانیکی ماده مرکب [20]

خواص مواد	0/90 Woven Roving E-Glass/Vinyl Ester
Density (kg/m ³)	1391
E _x (GPa)	17
E _y (GPa)	17
E _z (GPa)	7.48
G _{xy} (GPa)	4
G _{yz} (GPa)	1.73
G _{xz} (GPa)	1.73
ν _{xy}	0.13
ν _{yz}	0.28
ν _{xz}	0.28



شکل ۶ مقایسه تغییر شکل مرکز پوسته حاصل از نرم‌افزار آباکوس (پژوهش حاضر) و روش FEA مرجع [20]

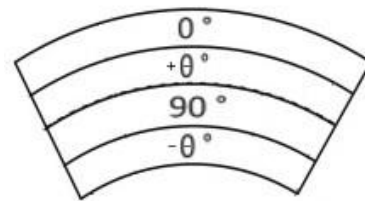
جدول ۴ نتایج حاصل از نرم‌افزار آباکوس (پژوهش حاضر) و روش FEA مرجع [20]

نرم‌افزار آباکوس (پژوهش حاضر)	روش FEA مرجع [20]	درصد خطا (%)
۱۱/۵۲	۱۱/۳۶	۱/۴

بیشینه تغییر شکل مرکز پوسته (mm)

تحلیل و بررسی

رویه‌های پوسته مورد بررسی (شکل ۳) از مواد مرکب ساخته شده‌اند که از چینش تعدادی تک‌لایه روی یکدیگر حاصل می‌شوند. زاویه قرارگیری و تعداد لایه‌های MLC، در تعیین خصوصیات پوسته اهمیت دارد. لذا با توجه به تعداد لایه‌ها برای هر چهار لایه که بر روی هم قرار می‌گیرد لایه‌چینی $[0^\circ / +\theta^\circ / 90^\circ / -\theta^\circ]$ انتخاب شده که در صورت افزایش تعداد لایه‌ها همین لایه‌چینی تکرار گردیده است (شکل ۷). از طرفی هسته پوسته مورد نظر از FGM ساخته شده است که از عوامل مهم اثرگذار بر روی این مواد، شاخص توان حجمی می‌باشد. بنابراین در ادامه اثر شاخص توان حجمی FGM، زوایای قرارگیری لایه‌ها و تعداد لایه‌های MLC مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۷ زوایای قرارگیری تک‌لایه‌ها در رویه MLC

مدل‌سازی عددی. در پژوهش حاضر، تحلیل عددی به روش اجزای محدود برای پوسته‌های استوانه‌ای ساخته‌شده از مواد مرکب چندلایه با هسته مواد هدفمند تحت ضربه انجام شده است که در نرم‌افزار آباکوس با استفاده از روش صریح مدل‌سازی و تحلیل صورت پذیرفته شده است. پوسته دارای ابعاد $a=b=1$ (شکل ۲) و شرایط تکیه‌گاهی در چهار لبه پوسته (شکل ۸) به صورت مفصلی می‌باشد. مابقی مشخصات هندسی پوسته بنابر مطالعه‌های پارامتری مشخص شده است. ضربه فرندر (Freder) به معادله (۴)، به سطح خارجی پوسته اعمال می‌شود. با بهره‌گیری از گزینه Nigom در نرم‌افزار آباکوس برای اثر تغییرشکل‌های بزرگ، پاسخ دینامیکی غیرخطی هندسی پوسته مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و گام زمانی $\Delta t = 0.01T$ انتخاب شده است که T دوره تناوب

طبیعی سازه می‌باشد. انتخاب گام زمانی مناسب از طریق سعی و خطا انجام شده است بدین صورت که با کوچک‌تر کردن اندازه گام زمانی تلاش و زمان محاسبات به مقدار زیادی افزایش می‌یابد در صورتی که پاسخ به مقدار ناچیزی تغییر می‌کند. از اثر استهلاک و میرایی صرف‌نظر شده است. به منظور شبکه‌بندی پوسته‌ها از مرجع [22] بهره جسته شد و جزء پوسته‌ای چهارگره‌ای (S4R) به ابعاد 10×10 میلی‌متر برای مدل‌سازی پوسته‌ها انتخاب شد. به منظور مدل‌سازی هسته FGM پوسته از مرجع [22] کمک گرفته شد که به صورت ۱۴ لایه همگن با ضخامت ۶ میلی‌متر انجام گردید که به صورت لایه‌های پیوسته به هم در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. دو ماده مرکب CFRP و GFRP که دارای کاربرد فراوانی می‌باشد، به عنوان رویه‌های MLC پوسته استوانه‌ای مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند. سعی بر آن بوده تا رویه‌های MLC به کار رفته هم‌وزن با هسته FGM پوسته باشند لذا با توجه به ثابت بودن طول و دهانه پوسته استوانه‌ای، تنها ضخامت رویه‌های MLC متغیر بوده و براساس نوع آن (CFRP و GFRP) و شاخص توان حجمی هسته FGM مشخص می‌گردد. همان‌طور که بیان شد پوسته استوانه‌ای مورد بررسی متشکل از مواد مرکب و مواد هدفمند می‌باشد که جنس به کار رفته شده در رویه‌ها و هسته پوسته به صورت، رویه داخلی / هسته / رویه خارجی، نمایش داده می‌شود. لذا در بررسی پارامترهای اثرگذار چهار حالت مختلف CFC مخفف CFRP/FGM/CFRP، CFG مخفف CFRP/FGM/CFRP، GFC مخفف GFRP/FGM/CFRP و GFG مخفف GFRP/FGM/GFRP در نظر گرفته شد.

$$P(x, y, t) = P_0 P_t(t) P_s(x, y) \quad (4)$$

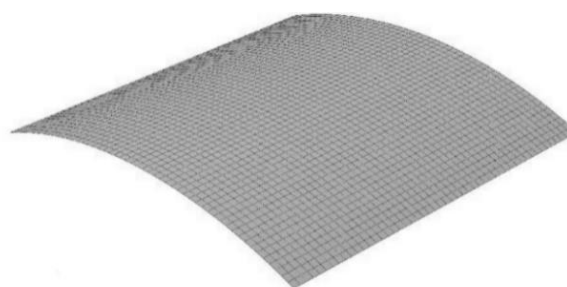
$$P_0 = 100 \text{ kPa} \quad (5)$$

$$P_s(x, y) = 1.0 \quad (6)$$

$$\text{Friedlander Function: } \begin{cases} P_t(t) = (1 - t/t_p)e^{-\alpha t/t_p}, & t \leq t_p \\ = 0, & t > t_p \end{cases} \quad (V)$$

جدول ۵ خواص مکانیکی مواد FGM [24]

نسبت پواسون	چگالی (kg/m ³)	ضریب کشسانی (GPa)	خواص مواد
۰/۳۳	۲۷۰۲	۶۷	آلومینیوم (فلز)
۰/۱۷	۳۱۰۰	۳۰۲	سیلیکون کاربید (سرامیک)



شکل ۸ شبکه‌بندی پوسته استوانه‌ای در پژوهش حاضر

جدول ۶ خواص مکانیکی مواد مرکب [25]

خواص مواد	CFRP	GFRP
Density (kg/m ³)	1572	2301
E _x (GPa)	121	46.3
E _y (GPa)	14	11.6
E _z (GPa)	14	11.6
G _{xy} (GPa)	5.05	4.28
G _{yz} (GPa)	5.02	4.18
G _{xz} (GPa)	5.05	4.28
ν _{xy}	0.17	0.25
ν _{yz}	0.40	0.39
ν _{xz}	0.020	0.062

ساخته شده است و مشخصات مکانیکی آنها در جدول (۶) نمایش داده شده است [25]. هندسه پوسته مورد نظر در شکل (۳) نشان داده شده است و شبکه‌بندی پوسته نیز در شکل (۸) نشان داده شده است.

پارامترهای مورد بررسی

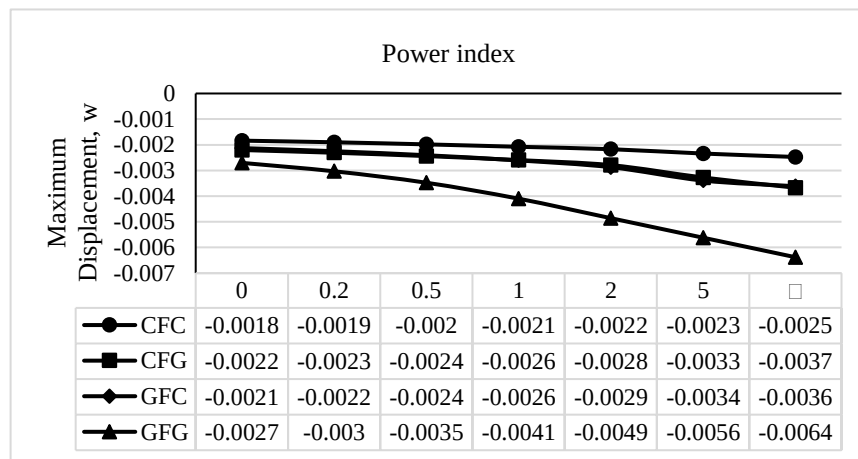
بررسی اثر شاخص توان حجمی (n). به منظور بررسی اثر شاخص توان حجمی ماده FGM در هسته پوسته هفت توان حجمی (n = 0.0, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, ∞) با انحنای ۰/۲۵ (شعاع ۴ متر) در معرض بار ضربه مدل‌سازی شدند که رویه‌های مرکب چندلایه در دو طرف هسته FGM به صورت

که P₀ ماکزیمم فشار در مدت زمان بارگذاری می‌باشد، P_t(t) توزیع فشار در محدوده زمان و P_s توزیع فشار بر روی سطح پوسته می‌باشد. α پارامتر شکل موج، t مدت زمان گذارنده شده و t_p زمان بارگذاری می‌باشد که در این پژوهش t_p = 20ms، α = 2 در نظر گرفته شده است [23].

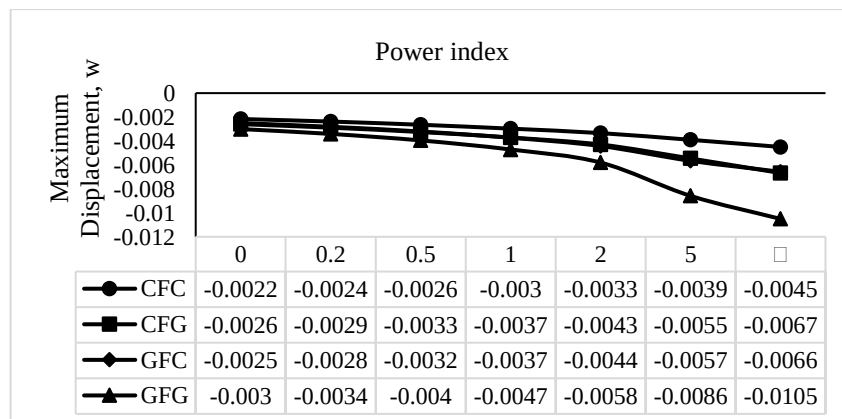
مشخصات مصالح مصرفی. نوع اختلاط مواد FGM به صورت فلز - سرامیک (آلومینیوم - سیلیکون کاربید) انتخاب شده است. خواص مکانیکی این مواد نظیر ضریب کشسانی، چگالی و نسبت پواسون در جدول (۵) آورده شده است [24]. رویه‌های MLC بالا و پایین پوسته‌ها که از مواد مرکب CFRP و GFRP

بیشترین و کمترین مقدار می‌باشد که در شاخص‌های توان حجمی بزرگ از شدت بیشتری برخوردار می‌باشد. تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته در برای هر یک از حالات GFG, GFC, CFG, CFC در شکل‌های (۱۰-۱۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، با افزایش شاخص توان حجمی، دامنه نوسانات و تعداد نقاط اوج تغییر مکان به ترتیب افزایش و کاهش یافته است که در حالت GFG دارای بیشترین دامنه نوسان و کمترین تعداد نقطه اوج می‌باشد اما در حالت CFC دارای کمترین دامنه نوسان و بیشترین تعداد نقطه اوج می‌باشد و حالت‌های CFG و GFC بین دو حالت CFC و GFG می‌باشد.

چهار لایه و با زوایای $[0^\circ / 45^\circ / 90^\circ / -45^\circ]$ لایه‌چینی شده‌اند. در شکل (۹) ماکزیمم جابه‌جایی پوسته به ازای شاخص‌های توان حجمی مختلف هسته FGM پوسته برای چهار حالت GFG, GFC, CFG, CFC در تحلیل دینامیکی خطی (الف-۹) و غیرخطی هندسی (ب-۹) مورد بررسی قرار گرفته شد، همان‌طور که مشاهده می‌شود ماکزیمم جابه‌جایی پوسته در حالت خطی کمتر از حالت غیرخطی هندسی می‌باشد و با افزایش شاخص توان حجمی مقدار بیشینه تغییر مکان افزایش یافته است، به‌طوری‌که بیشینه تغییر مکان در پوسته تمام فلزی ($n = \infty$) و کمینه تغییر مکان در پوسته تمام سرامیکی ($n = 0$) اتفاق افتاده است. همچنین ملاحظه می‌شود که شیب تغییرات ماکزیمم جابه‌جایی در حالت‌های GFG و CFC به ترتیب دارای



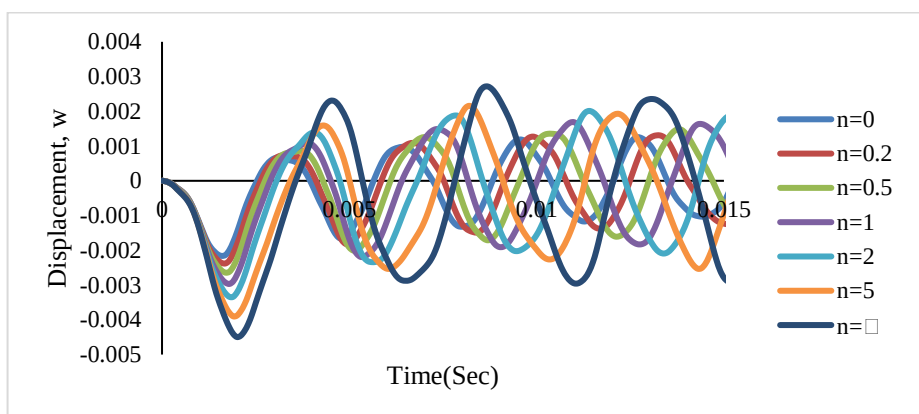
(الف)



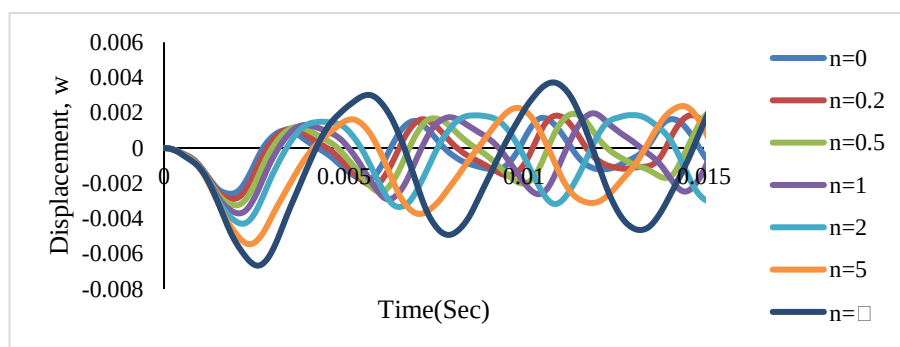
(ب)

شکل ۹. بیشینه تغییر مکان پوسته بر حسب شاخص توان حجمی هسته FGM پوسته در تحلیل دینامیکی خطی (الف)

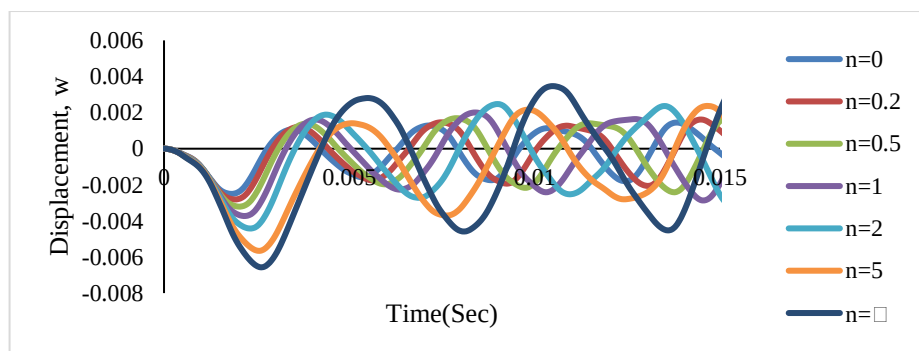
و در تحلیل دینامیکی غیرخطی هندسی (ب)



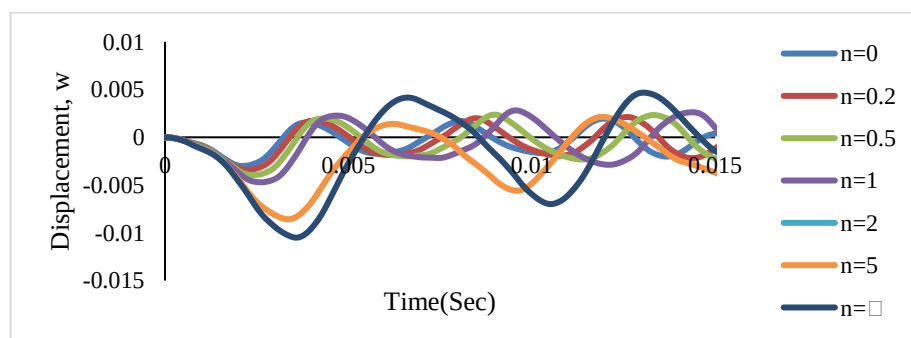
شکل ۱۰ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته با شاخص‌های توان حجمی مختلف برای هسته FGM پوسته در حالت CFC



شکل ۱۱ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته با شاخص‌های توان حجمی مختلف برای هسته FGM پوسته در حالت CFG



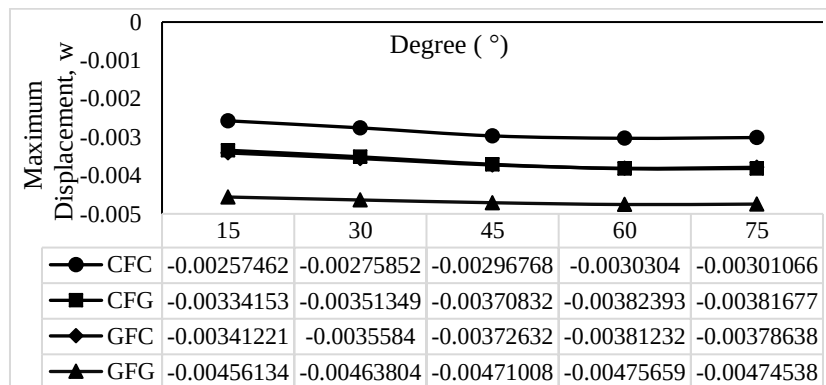
شکل ۱۲ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته با شاخص‌های توان حجمی مختلف برای هسته FGM پوسته در حالت GFC



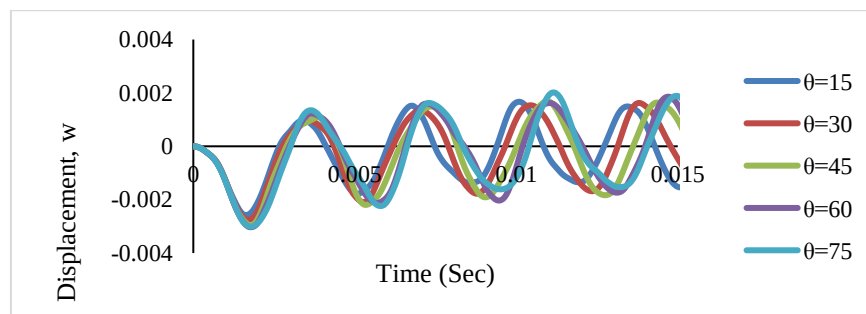
شکل ۱۳ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته با شاخص‌های توان حجمی مختلف برای هسته FGM پوسته در حالت GFG

جابه‌جایی را در پوسته می‌شود. از طرفی با افزایش زاویه قرارگیری الیاف نسبت به راستای بدون انحنای پوسته، شیب تغییرات ماکزیمم جابه‌جایی کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد قرارگیری الیاف در راستای بدون انحنای پوسته تأثیر بیشتری بر روی پاسخ می‌گذارد. تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته در برای هر یک از حالات GFG, GFC, CFG, CFC در شکل‌های (۱۸-۱۵) نشان داده شده است. با افزایش θ ، تعداد نقاط اوج تغییر مکان مرکز پوسته کاهش یافته است و همچنین در حالت GFG دارای کمترین تعداد نقطه اوج می‌باشد اما در حالت CFC دارای بیشترین تعداد نقطه اوج می‌باشد.

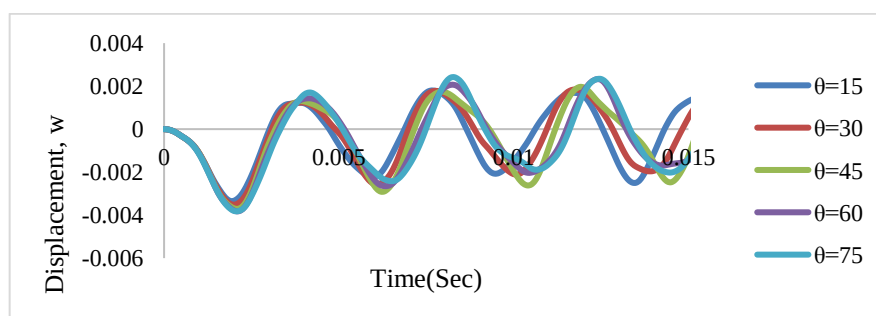
نحوه قرارگیری لایه‌ها در رویه‌های مرکب. به منظور بررسی نحوه قرارگیری تک‌لایه‌ها در رویه‌های مرکب چندلایه، پنج زاویه ($\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت (شکل ۳). پوسته‌هایی با انحنای 0.25 (شعاع 4 متر)، ضخامت 12 میلی‌متر و با هسته FGM دارای شاخص توان حجمی $n=1$ در معرض بار ضربه مدل‌سازی شدند. در شکل (۱۴) ماکزیمم جابه‌جایی‌های غیرخطی هندسی پوسته به ازای زوایای مختلف در حالت‌های GFG, GFC, CFG, CFC به دست آورده شد که مشاهده می‌شود در حالتی که $\theta = 15^\circ$ انتخاب گردد کمترین ماکزیمم جابه‌جایی در پوسته رخ می‌دهد و از طرفی انتخاب $\theta = 60^\circ$ موجب بیشترین ماکزیمم



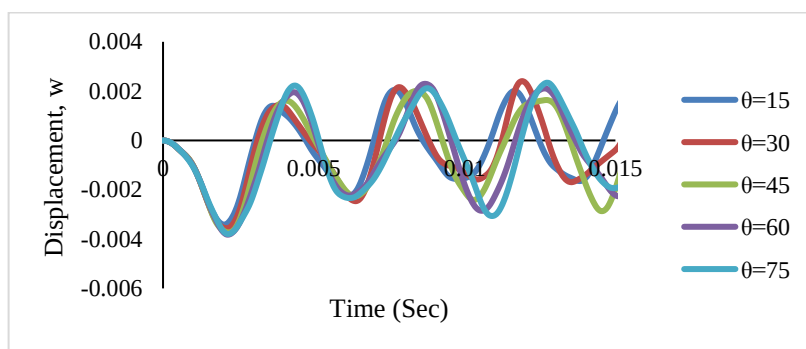
شکل ۱۴ بیشینه تغییر مکان غیرخطی هندسی پوسته بر حسب زوایای مختلف قرارگیری الیاف در لایه‌ها



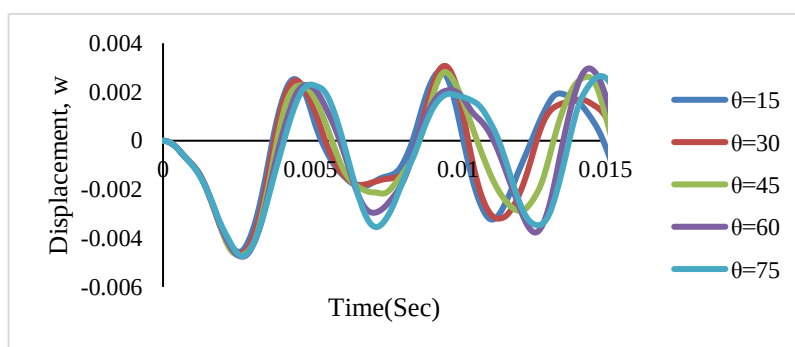
شکل ۱۵ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای زوایای مختلف قرارگیری الیاف در لایه‌ها در حالت CFC



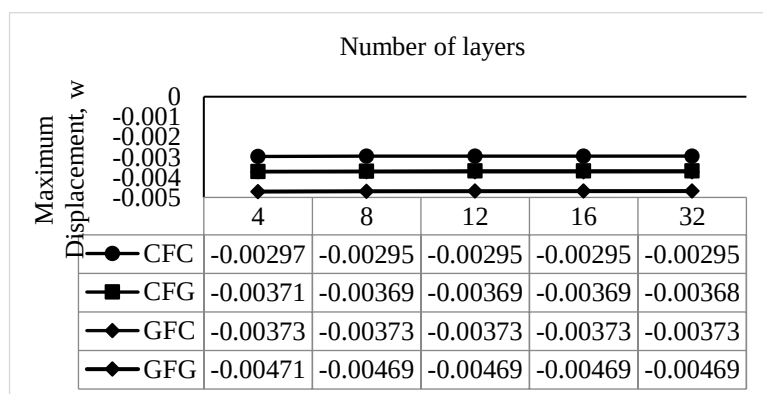
شکل ۱۶ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای زوایای مختلف قرارگیری الیاف در لایه‌ها در حالت CFG



شکل ۱۷ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای زوایای مختلف قرارگیری الیاف در لایه‌ها در حالت GFC



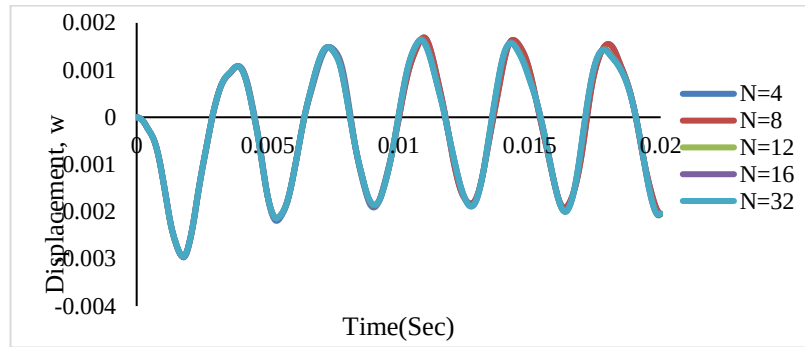
شکل ۱۸ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای زوایای مختلف قرارگیری الیاف در لایه‌ها در حالت GFG



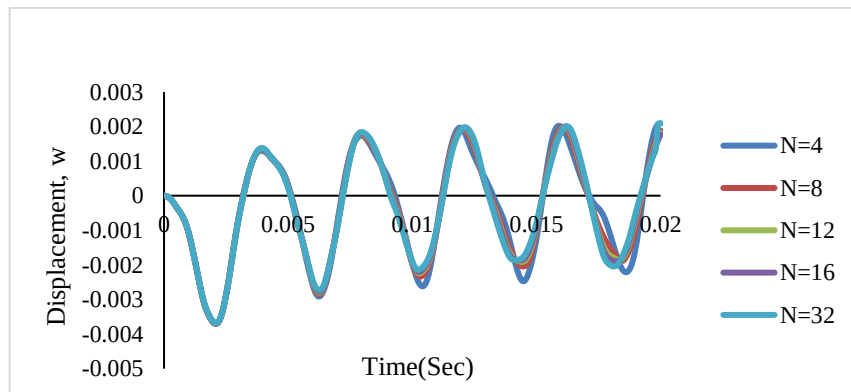
شکل ۱۹ بیشینه تغییر مکان غیرخطی هندسی پوسته بر حسب تعداد لایه‌های مختلف

رویه‌های مرکب پوسته بیشینه تغییر مکان با شیب ملایمی کاهش می‌یابد که در حالت CFC و GFG پوسته به ترتیب کمترین و بیشترین تغییر مکان‌ها را دارد. تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته در برای هر یک از حالات GFG, CFC, CFG در شکل‌های (۲۳-۲۰) نشان داده شده است. با افزایش تعداد لایه، تعداد نقاط اوج تغییر مکان مرکز پوسته ثابت خواهد بود. از طرفی پوسته در حالت GFG دارای کمترین تعداد نقطه اوج می‌باشد اما در حالت CFC دارای بیشترین تعداد نقطه اوج می‌باشد.

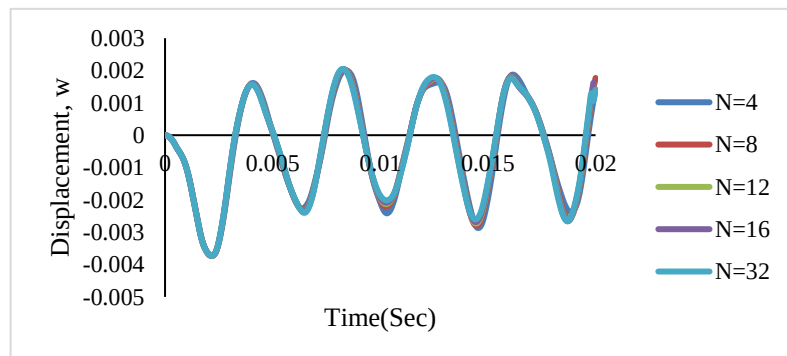
بررسی اثر تعداد لایه‌های رویه‌های مرکب. به منظور بررسی اثر تعداد لایه‌های رویه‌های مرکب در پوسته، مدل‌های دارای ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۳۲ لایه در معرض بار ضربه قرار گرفته شدند. در این بررسی انحنای ۰/۲۵ (شعاع ۴ متر) و لایه‌چینی $[45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ]$ برای هر ۴ لایه در رویه‌های مرکب پوسته می‌باشد و نیز برای هسته FGM پوسته، شاخص توان حجمی $n=1$ در نظر گرفته شد. در شکل (۱۹) ماکزیمم جابه‌جایی غیرخطی هندسی پوسته به ازای تعداد لایه‌های مختلف برای چهار حالت CFC, CFG, GFC, GFG مورد بررسی قرار گرفته شد. همان طور که مشاهده می‌شود افزایش تعداد لایه در



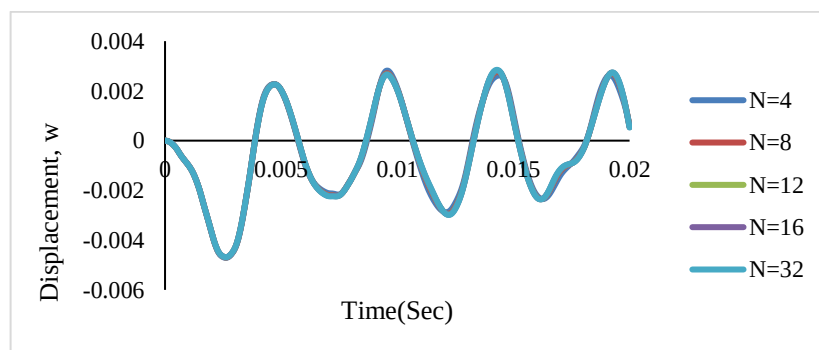
شکل ۲۰ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای تعداد لایه‌های مختلف در حالت CFC



شکل ۲۱ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای تعداد لایه‌های مختلف در حالت CFG



شکل ۲۲ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای تعداد لایه‌های مختلف در حالت GFC



شکل ۲۳ تاریخچه زمانی تغییر مکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای تعداد لایه‌های مختلف در حالت GFG

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به منظور ارزیابی رفتار دینامیکی غیرخطی هندسی پوسته‌های استوانه‌ای مواد مرکب با هسته FGM تحت بار ضربه از نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus استفاده شد. پس از اطمینان از روش مدل‌سازی پوسته‌های هدفمند و پوسته‌های مواد مرکب، عوامل اثرگذار پوسته استوانه‌ای مرکب با هسته FGM شامل شاخص توان حجمی، زوایای مختلف قرارگیری الیاف در مواد مرکب و تعداد لایه‌های مواد مرکب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مقایسه و ارزیابی رفتار دینامیکی پوسته‌ها به‌طور خلاصه در ادامه آمده است.

- تغییر مکان غیرخطی هندسی بیشتر از تغییر مکان خطی در مرکز پوسته می‌باشد و با افزایش شاخص توان حجمی، مقدار تغییر مکان مرکز پوسته افزایش پیدا کرده است، به‌طوری‌که بیشینه تغییر مکان در پوسته تمام فلزی ($n = \infty$) و کمینه تغییر مکان در پوسته تمام سرامیکی ($n = 0$) اتفاق افتاده است و پاسخ پوسته‌های دیگر بین این دو حالت بیشینه و کمینه قرار گرفته است از طرفی در حالت CFC و GFG پوسته به ترتیب کمترین و بیشترین تغییر مکان‌ها را دارد. به گونه‌ای که با تغییر شاخص توان حجمی از صفر (سرامیک خالص) تا بی‌نهایت (فلز خالص)، تغییر مکان در حالت CFC، $2/0.8$ برابر در حالت CFG $2/0.57$ برابر، در حالت GFC $2/0.63$ برابر و در حالت GFG $3/0.50$ برابر خواهد شد.

- با بررسی نحوه قرارگیری تک‌لایه‌ها مشاهده شد که با انتخاب $\theta = 15^\circ$ کمترین ماکزیمم جابه‌جایی در پوسته رخ می‌دهد و از طرفی با انتخاب $\theta = 60^\circ$ موجب بیشترین ماکزیمم جابه‌جایی را در پوسته خواهد شد. به گونه‌ای که با تغییر زاویه از 15° درجه به 60° درجه بیشینه تغییر مکان در حالت CFC $17/3\%$ ، در حالت CFG $14/43\%$ ، در حالت GFC $11/72\%$ و در حالت GFG $4/27\%$ افزایش خواهد یافت.

- با بررسی اثر تعداد لایه‌های مواد مرکب چندلایه در رویه‌های بالا و پایین پوسته مشاهده شد که با افزایش تعداد لایه‌ها، مقدار

مراجع

1. M. Bever, and P. Duwez, "Gradients in composite materials," *Materials Science and Engineering*, vol. 10, no.7, pp. 1-8, 1972.

فهرست علائم

A	طول پوسته در راستای محور x mm
b	عرض پوسته در راستای محور y mm
h	ضخامت پوسته در راستای شعاع استوانه mm
n	شاخص توان حجمی
p_c	بیانگر خواص مواد سرامیکی
p_m	بیانگر خواص مواد فلزی
$P_s(x, y, t)$	تابع بار ضربه
$P_t(t)$	تابع بار ضربه در حوزه زمان
$P_s(x, y)$	تابع بار ضربه در حوزه مکان
t	زمان، sec
t_p	مدت زمان بارگذاری، sec
α	پارامتر شکل موج
θ	زاویه قرارگیری لایه‌ها
N	تعداد لایه‌ها

سپاسگزاری

2. M. Koizumi, "FGM activities in Japan," *Composites Part B: Engineering*, vol. 28, no. 4, pp. 1-4, 1997.
3. C. Horgan, and A. Chan, "The pressurized hollow cylinder or disk problem for functionally graded isotropic linearly elastic materials," *Journal of Elasticity*, vol. 55, no. 1, pp. 43-59, 1999.
4. N. Tutuncu, and M. Ozturk, "Exact solutions for stresses in functionally graded pressure vessels," *Composites Part B: Engineering*, vol. 32, no. 8, pp. 683-686, 2001.
5. J. Seidi, "Buckling analysis of Truncated conical Sandwich Shells with FGM Face sheets using Improved Higher-order Theory," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 48, no. 4, pp. 337-340, 2019.
6. Sheinman, and S. Greif, "Dynamic analysis of laminated shells of revolution," *Journal of Composite Materials*, vol. 18, pp. 200-215, 1984.
7. R. L. Ramkumar, and Y. R. Thakar, "Dynamic response of curved laminated plates subjected to low velocity impact," *ASME Journal of Engineering and Material Technology*, vol. 109, pp. 67-71, 1987.
8. W. S. Johnson, and M. W. Hammond, "Crack growth behavior of internal titanium plies of a fiber metal laminate," *Composites: Part A*, vol. 39, pp. 1705-1715, 2008.
9. P. Christoforu, S. R. Swanson, S. C. Venterllo, and S. W. Beckwith, "Impact damage of carbon/epoxy composite cylinders," *Proceeding of the 32nd international SAMPE symposium and exhibition*, vol. 32, pp. 964-973, 1987.
10. P. Christoforu, S. R. Swanson, and S. W. Beckwith, "Lateral impact of composite cylinders," *Composite Materials: Fatigue and Fracture*, vol. 2, pp. 373-386, 1989.
11. S. Kumar, B. Nageswara Rao, and B. Pradhan, "Effect of impactor parameters and laminate characteristics on impact response and damage in curved composite laminates," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 26, no. 13, pp. 1273-1290, 2007.
12. S. C. Her, and Y. C. Liang, "The finite element analysis of composite laminates and shell structures subjected to low velocity impact," *Composite Structures*, vol. 66, no. 1, pp. 277-285, 2004.
13. H. Kiratisaeevee, and W. J. Cantwell, "The impact response of aluminum foam sandwich structures based on a glass fiber-reinforced polypropylene fiber-metal laminate," *Polymer Composite*, vol. 25, no. 5, pp. 499-509, 2004.
14. J. W. Hutchinson, and M. Y. He, "Buckling of cylindrical sandwich shells with metal foam cores," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 37, no. 46-47, pp. 6777-6794, 2000.
15. K. Garg, R. K. Khare, and T. Kant, "Higher-order closed-form solutions for free vibration of laminated composite and sandwich shells," *Journal of Sandwich Structures & Materials*, vol. 8, no. 3, pp. 205-235, 2006.
16. O. Rahmani, S. M. R. Khalili, and K. Malekzadeh, "Free vibration response of composite sandwich cylindrical shell with flexible core," *Composite Structures*, vol. 92, pp. 1269-1281, 2010.
17. H. Yin, L. Sun, and G. H. Paulino, "Micromechanics-based elastic model for functionally graded materials with particle interactions," *Acta Materialia*, vol. 52, no. 12, pp. 3535- 3543, 2004.
18. H. S. Shen, *Functionally graded materials: nonlinear analysis of plates and shells*, CRC press, 2016. [E-book].
19. Hajlaoui, E. Triki, A. Frikha, M. Wali, and F. Dammak, "Nonlinear dynamics analysis of FGM shell structures with a higher order shear strain enhanced solid-shell element," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 14, no. 1, pp. 72-91, 2017.

20. M. S. Hoo Fatt, and D. Sirivolu, "Dynamic Stability of Double-Curvature Composite Shells under External Blast," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 77, pp. 281-290, 2015.
21. V. Vasilief, and V. Morozof, *Advanced Mechanics of Composite Materials*", Elsevier, London, 1th ed, 2007. [E-book].
22. M. Shahraki, F. Shahabian, and M. Koohestani, "The nonlinear dynamic analysis of elasto-plastic behaviour of the single-curved FGM shells under impact load," *AUT Journal of Civil Engineering*, vol. 4, no. 3, 2020.
23. Aksoylar, A. Ömercikoğlu, Z. Mecitoğlu, and M. H. Omurtag, "Nonlinear transient analysis of FGM and FML plates under blast loads by experimental and mixed FE methods," *Composite Structures*, vol. 94, no. 2, pp. 731-744, 2012.
24. R. Gunes, M. Aydin, M. K. Apalak, and J. Reddy, "The elasto-plastic impact analysis of functionally graded circular plates under low-velocities," *Composite Structures*, vol. 93, no. 2, pp. 860-869, 2011.
25. S. T. Kaneko, S. Ujihashi, H. Yomoda and S. Inagi, "Finite element method failure analysis of a pressurized FRP cylinder under transverse impact loading. *Thin-walled structures*," vol. 46, no. 7-9, pp. 898-904, 2008.

CONTENTS

Evaluating the Spatial Effects of Environmental Factors on Urban Crashes by Spatial Bayes Method	Mohammad Sedigh Bavar - Ali Naderan Mahmoud Saffarzadeh	1
Investigation of Progressive Collapse of Knee Braced Frame in Steel Structures under Fire Loading	Marzieh Akbari - Ali Mohammad Rousta Ali Alipour Mansourkhani - Hamed Enayati	21
Assessment of the effect of the tuned mass damper on the seismic performance of isolated steel structures by using endurance time analysis	Milad Zarbilinezhad - Amin Gholizad	41
Modeling and Analyzing the Accidents Severity due to the Lack of Attention to the Front in COVID-19 Restrictions using Logistic Regression	Maziar Abolfazlzadeh - Seyed Ebrahim Abdolmanafi Hassan Khaksar	61
Semi-Active Control of Three-Story Benchmark Structure Using a Wireless Sensor Network	Hossein Fazaeli - Abbas Karamodin	73
Geometric Nonlinear Dynamic Analysis of MLC Cylindrical Shells with FGM Core under Impact Load using by Finite Element Method (Research Note)	Mojtaba Shahraki - Farzad Shahabian Moghadam	89



**JOURNAL OF
CIVIL ENGINEERING
FERDOWSI UNIVERSITY OF MASHHAD**

ISSN 2008-7454

General Director: F. Irani
Editor-Chief: M. R. Esfahani
Published: Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

M. Reza Esfahani	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
K. badv	Professor, Urmia University
J. Bolouri Bazaz	Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad
A. Pouya	Professor, Ecole des Ponts Paris tech
S. M. Hosseini	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
N. Hafezi Moghaddas	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
E. Seyedi Hosseininia	Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad
Sh. Danesh	Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad
Gh. Rakhshandehro	Professor, Shiraz University
M. H. Sebt	Professor, Amirkabir University of Technology
F. Shahabian Moghadam	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
A. Kavussi	Professor, Tarbiat Modares University
H. Ganji Doost	Professor, Tarbiat Modares University
M. Faghfour Maghrebi	Professor, Ferdowsi University of Mashhad
F. Moghadas Nejad	Professor, Amirkabir University of Technology
A. Mohammadzadeh Moghaddam	Associate Professor, Ferdowsi University of Mashhad
M. Kianoush	Professor, University of Ryerson

Text Editor: M. Dehghan

Administrative Director: T. Hooshmand

Typist: A. Noie – T. Hooshmand

Journal of Civil Engineering

Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad.

P. O. Box. 91775-1111, Mashhad, I.R.IRAN

Tel: +98 51 38806024; **Email:** civil-ferdowsi@um.ac.ir

Web site: <http://civil-ferdowsi.um.ac.ir>

ISSN 2783-2805



Journal of Ferdowsi Civil Engineering

Serial No. 42

- Evaluating the Spatial Effects of Environmental Factors on Urban Crashes by Spatial Bayes Method** 1
Mohammad Sedigh Bavar
Ali Naderan Mahmoud Saffarzadeh
- Investigation of Progressive Collapse of Knee Braced Frame in Steel Structures under Fire Loading** 21
Marzieh Akbari - Ali Mohammad Roustaa
Ali Alipour Mansourkhani - Hamed Enayati
- Assessment of the Effect of the Tuned Mass Damper on the Seismic Performance of Isolated Steel Structures by Using Endurance Time Analysis** 41
Milad Zarbilinezhad - Amin Gholizad
- Modeling and Analyzing the Accidents Severity due to the Lack of Attention to the Front in COVID-19 Restrictions using Logistic Regression** 61
Maziar Abolfazlzadeh - Seyed Ebrahim Abdolmanafi
Hassan Khaksar
- Semi-Active Control of Three-Story Benchmark Structure Using a Wireless Sensor Network** 73
Hossein Fazaeli - Abbas Karamodin
- Geometric Nonlinear Dynamic Analysis of MLC Cylindrical Shells with FGM Core under Impact Load using by Finite Element Method (Research Note)** 89
Mojtaba Shahraki - Farzad Shahabian Moghadam

Vol. 36, No. 2
Summer, 2023