



Dynamic deflection control of reinforced concrete frame under earthquake load with piezoelectric layer

M. Rabani bidgoli^{1,2*}, M. Kargar¹, H. Mazaheri¹

¹ Department of Civil Engineering, Khomein Branch, Islamic Azad University, Khomein, Iran,

² Department of Civil Engineering, Jasb Branch, Islamic Azad University, Jasb, Iran

ABSTRACT: Piezoelectric materials are a type of smart materials that are of interest to many researchers in various engineering sciences due to their extraordinary properties such as converting mechanical energy into electrical energy and vice versa. In this article, the determination and control of the dynamic deformation of a one-span concrete frame with a piezoelectric layer coating on beams and columns under seismic load is discussed. In order to control the dynamic deformation of the concrete frame, a proportional-derivative controller has been used in such a way that a piezoelectric layer is considered as an actuator and a layer as a sensor. The governing equations for the beam and column components of concrete frame are obtained by using high-order shear theory, calculating energy relations, applying Hamilton's principle and considering the applied voltage on piezoelectric materials. In order to solve the dynamic coupled equations, the numerical method of differential quadrature method has been used and finally, with the help of Newmark method, the dynamic deformation of the concrete frame is calculated. After validating the results, the effect of various parameters such as voltage applied to the piezoelectric layer, piezoelectric type controller, thickness of the piezoelectric layer on dynamic deformation were investigated. Here, the optimal values of controller parameters, including proportionality coefficient and derivative coefficient, were obtained as 3.824 and 5.812, respectively. The results show that the use of the controller leads to a reduction of 72 and 65 percent of the lateral and vertical dynamic deflection of the frame, respectively.

Review History:

Received: Dec. 11, 2023

Revised: Mar. 03, 2024

Accepted: Mar. 24, 2024

Available Online: Apr. 1, 2024

Keywords:

Dynamic deflection

concrete frame

numerical method

piezoelectric controller

mathematical modeling

1- Introduction

Today, continuous mechanics models are widely used for mathematical modeling of structures. But in the field of mathematical modeling of concrete elements used in structures such as beams and columns, using the energy method based on the theory of elasticity, limited research has been done. In 2016, Jafarian Arani et al. [1] simulated the buckling of concrete beams reinforced with carbon nanotubes using Euler-Bernoulli and Timoshenko beam theories. Using the theory of the previous article, Safari Biloyi et al [2] analyzed the buckling of reinforced concrete columns with FRP layers. They concluded that the presence of FRP layer greatly reduces the buckling load. Arbabi et al. [3] in 2017 investigated the buckling of columns reinforced with silica nanoparticles under an electric field. In 2017, Zamaniyan et al. [4] investigated the effect of accumulation on the buckling behavior of concrete columns reinforced with silica nanoparticles. Mohammadian et al. [5] in 2017 analyzed the dynamic analysis of concrete beams reinforced with iron oxide nanoparticles under a magnetic field with the help of high-order hyperbolic theory. They concluded that the magnetic field reduces the dynamic deflection of the structure by about 54%.

In the previously mentioned research, the topic of the smart structure was not discussed. Nowadays, the use of smart materials in concrete structures and other structures is one of the new topics and ideas that many researchers are looking for. With the help of these materials, we can control the dynamic behavior of a structure and prevent its damage and fracture. Zhang and Kei [6] analyzed the vibrations, buckling, and bending of circular plates covered with piezoelectric layers. They used the numerical method of cubic differential method to solve the governing equations.

According to the search in the technical literature, the analysis and control of the dynamic response of concrete frames with piezoelectric layer as actuator and sensor under the effect of earthquake based on the energy method and using the numerical method of differential quadrature has not been done. Therefore, in this article, the dynamic response of the concrete frame covered with a smart layer is numerically analyzed to control the dynamic behavior of the structure under the effect of an earthquake. For this purpose, for the mathematical modeling of the structure, the shear deformation theory of the beam is used, and with the help of the energy method and Hamilton's principle, the governing equations are derived considering the piezo layer. Finally, using the

*Corresponding author's email: mahmood.rabanibidgoli@iau.ac.ir



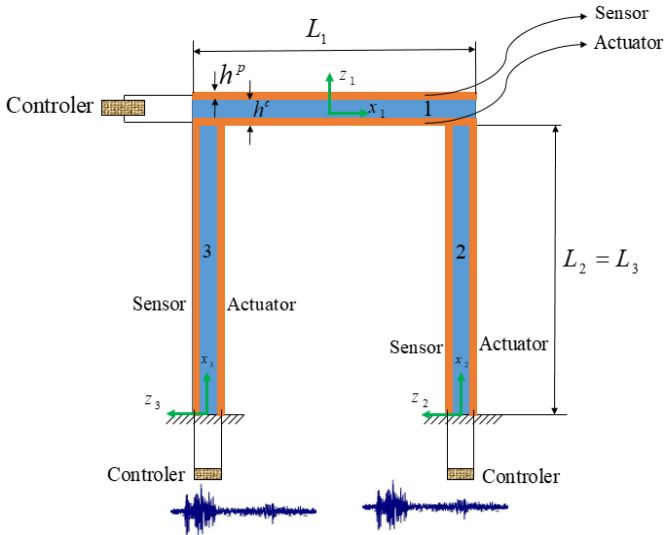


Fig. 1. Schematic of the concrete frame covered with piezoelectric layers as actuator and sensor

numerical solution, the lateral and vertical dynamic deflection of the system is calculated and the effect of parameters such as the presence and location of the piezoelectric layer, the thickness of the piezoelectric layer, the voltage applied to the piezoelectric layer, the controlling effect of the piezoelectric layer and the boundary conditions on the seismic response of the frame is investigated.

2- Mathematical modeling

The schematic configuration of the concrete frame with the piezoelectric controller is shown in figure (1). This figure shows a concrete frame with a span including the length of the beam L_1 , the length of the columns $L_2 = L_3$, the thickness of the concrete h_c and the thickness of the piezoelectric layers h_p . The beams and columns of the concrete frame are covered with two piezoelectric layers, one of which acts as an actuator and the other as a sensor. The output signal from the sensor enters into the proportional-derivative controller (PD) and after modifying the signal by the actuator, it enters the structure. Beam coordinate axes are shown with x_1 and z_1 in the longitudinal and thickness directions respectively, and column coordinate axes are shown with x_2, x_3 and z_2, z_3 in the longitudinal and thickness directions respectively. The frame is located on the supports with various boundary conditions and is under seismic load.

3- Discussion and Result

Lateral and vertical dynamic deflections according to the acceleration time history of the Bam earthquake are shown in figures (2) and (3) for the states with and without controllers, respectively. It is worth mentioning that because there is no steady state error in the dynamic analysis of the structure, the presence of integral gains not only does not improve the dynamic response of the system but also slows down the

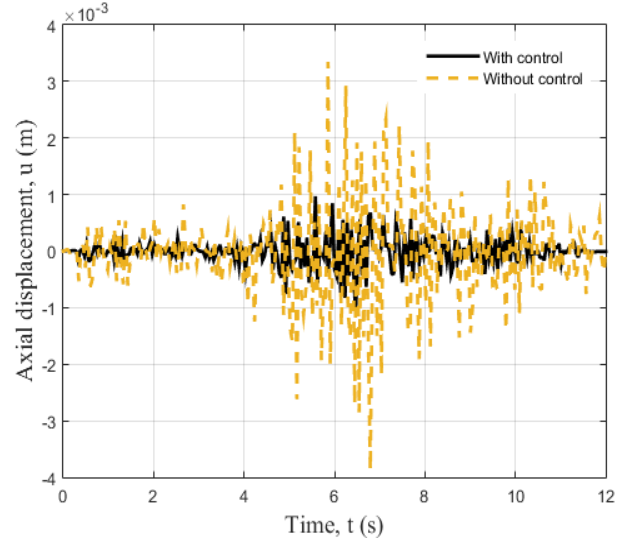


Fig.2. Effect of controller on the lateral dynamic deflection of concrete frame under earthquake

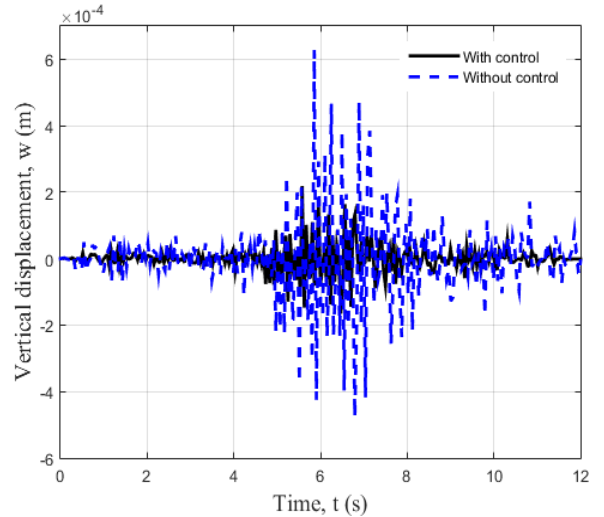


Fig. 3. Effect of the controller on the vertical dynamic deflection of the concrete frame under earthquake

response. Therefore, a proportional-derivative controller is used in this article. For this purpose, the optimal values of the controlling parameters, including proportionality coefficient (G_p) and derivative coefficient (G_v), were obtained as 3.824 and 5.812, respectively.

4- Conclusions

In this article, the dynamic analysis and control of the concrete frame covered with piezoelectric layer on beam and columns under seismic load was discussed. In order to control the concrete frame, a proportional-

derivative controller was used in such a way that one piezoelectric layer was considered as the actuator and the other as the sensor. To derive the governing equations of the concrete frame with piezoelectric layer, first, the frame was mathematically modeled with the help of high-order hyperbolic shear deformation theory and energy method, and finally, to couple the obtained equations for the beam and columns, from the continuity boundary conditions at the points connecting beams to columns was used. In order to numerically solve the dynamic coupled equations, for the first time, the differential quadrature method along with the Newmark method was used. The advantage of this method is the high accuracy of the results along with the high speed of its calculation. The results show that for the number of grid points 15, the dynamic deflection obtained from the differential quadrature method converges. Also, if a piezoelectric controller is used, the deflection range will be greatly reduced and the damping time of the system will be shorter. Among other main results of this research, we can mention the significant effect of external voltage on the dynamic deflection of the frame, so that by applying a negative external voltage to the piezoelectric layer, the dynamic deflection will decrease and vice versa.

References

- [1] A. Jafarian Arani, R. Kolahchi, Buckling analysis of embedded concrete columns armed with carbon nanotubes, *Computers and Concrete*, 17 (2016) 567-578.
- [2] B. Safari Bilouei, R. Kolahchi, M. Rabani Bidgoli, Buckling of concrete columns retrofitted with Nano-Fiber Reinforced Polymer (NFRP), *Computers and Concrete*, 18(5) (2016) 1053-1063.
- [3] A. Arbabi, R. Kolahchi, M. Rabani Bidgoli, Concrete columns reinforced with Zinc Oxide nanoparticles subjected to electric field: buckling analysis, *Wind and Structures*, 24 (2017) 431-446.
- [4] M. Zamanian, R. Kolahchi, M. Rabani Bidgoli, Agglomeration effects on the buckling behaviour of embedded concrete columns reinforced with SiO₂ nanoparticles, *Wind and Structures*, 24 (2017) 43-57.
- [5] H. Mohammadian, R. Kolahchi, M. Rabani Bidgoli, Dynamic response of concrete beams reinforced by Fe₂O₃ nanoparticles subjected to magnetic field and earthquake load, *Earthquakes and Structures*, 13(6) (2017) 589-598.
- [6] X. Zhang, H. Qi, Dynamic behavior of an inhomogeneous piezoelectric/piezomagnetic half space with a circular ring structure under SH wave, *Wave Motion*, 114 (2022) 103037.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Rabani bidgoli, M. Kargar, H. Mazaheri, *Dynamic deflection control of reinforced concrete frame under earthquake load with piezoelectric layer*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 56(2) (2024) 49-52.

DOI: [10.22060/ceej.2024.22858.8058](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.22858.8058)





کنترل تغییر شکل دینامیکی قاب بتن آرمه تحت بار زلزله با استفاده از لایه پیزوالکتریک

محمود ربانی بیدگلی^{۱*}، مسعود کارگر^۱، حمید مظاهری^۲

۱- گروه مهندسی عمران، واحد خمین، دانشگاه آزاد اسلامی، خمین، ایران
۲- گروه مهندسی عمران، واحد جاسب، دانشگاه آزاد اسلامی، جاسب، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰
بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۳
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۰۵
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۱/۱۳

کلمات کلیدی:

تغییر شکل دینامیکی
قاب بتنی
روش عددی
کنترل کننده پیزوالکتریک
مدل سازی ریاضی

خلاصه: مواد پیزوالکتریک نوعی از مصالح هوشمند می‌باشند که به دلیل خصوصیات فوق العاده همانند تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی و بالعکس مورد توجه پژوهشگران زیادی در علوم مهندسی مختلف قرار دارند. امروزه استفاده از این مصالح، برای کنترل تغییر شکل، کاهش نوسان و کنترل فعال سازه‌ها در صنعت ساختمان رو به افزایش می‌باشد. در این مقاله، به تعیین و کنترل تغییر شکل دینامیکی یک قاب بتنی یک دهانه با پوشش لایه پیزوالکتریک روی تیر و ستون‌ها تحت بار لرزه‌ای پرداخته می‌شود. به منظور کنترل تغییر شکل دینامیکی قاب بتنی، از یک کنترل کننده تناسبی- مشتقی استفاده شده است بدین شکل که یک لایه پیزوالکتریک در نقش محرک و یک لایه در نقش سنسور در نظر گرفته می‌شود. معادلات حاکم بر اجزا تیر و ستون قاب بتنی با استفاده از تئوری برشی مرتبه بالا، محاسبه روابط انرژی، اعمال اصل همپلتون و در نظر گرفتن ولتاژ اعمالی بر مصالح پیزوالکتریک به دست می‌آیند. جهت کوپل کردن معادلات بدست آمده برای تیر و ستون، از شرایط مرزی پیوستگی در نقاط اتصال تیر به ستون‌ها به یکدیگر استفاده می‌شود. به منظور حل عددی معادلات کوپل شده دینامیکی، از روش عددی تفاضلات مربعی استفاده شده است در این روش، معادلات دیفرانسیلی به معادلات جبری تبدیل شده و در نهایت به کمک روش نیومارک، تغییر شکل دینامیکی قاب بتنی بر حسب زمان محاسبه می‌گردد. بعد از صحت‌سنجی نتایج، اثر پارامترهای مختلفی همچون ولتاژ اعمالی به لایه پیزوالکتریک، کنترل کننده از نوع پیزوالکتریک، ضخامت لایه پیزوالکتریک و اثرات ترکیبی آنها بر تغییر شکل دینامیکی بررسی شد. در اینجا، مقادیر بهینه پارامترهای کنترل کننده شامل ضریب تناسب و ضریب مشتق به ترتیب برابر با $3/824$ و $5/812$ به دست آمدند. نتایج نشان می‌دهد برای تعداد نقاط شبکه ۱۵، تغییر شکل دینامیکی بدست آمده از روش تفاضلات مربعی همگرا می‌شود. همچنین، اگر از یک کنترل کننده از نوع پیزوالکتریک استفاده شود، دامنه نوسانات تغییر شکل به شدت کاهش یافته و زمان میرایی سیستم کوتاه‌تر خواهد شد. به عبارت دیگر استفاده از کنترل کننده به ترتیب منجر به کاهش ۷۲ و ۶۵ درصدی تغییر شکل دینامیکی جانبی و قائم قاب می‌شود. همچنین مشاهده شد، که تغییر شکل دینامیکی جانبی قاب درحالی که فقط ستون‌ها لایه پیزوالکتریک دارند کمتر از حالتی است که فقط تیر لایه پیزوالکتریک دارد درحالی که این موضوع برای خیز دینامیکی قائم قاب بالعکس می‌باشد.

۱- مقدمه

ستون بتنی مقاوم شده با لایه FRP پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که وجود لایه FRP تا حد زیادی بار کمانشی را کاهش می‌دهد. اربابی و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۳] کمانش ستون‌های تقویت شده با نانو ذرات سیلیس تحت میدان الکتریکی را مورد بررسی قرار دادند. زمانیان و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۴] اثر انباشتگی روی رفتار کمانش ستون‌های بتنی تقویت شده با نانو ذرات سیلیس را مورد بررسی قرار دادند. محمدیان و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۵] به آنالیز دینامیکی تیرهای بتنی تقویت شده با نانوذرات اکسید آهن تحت میدان مغناطیسی به کمک تئوری مرتبه بالای هایپربولیک پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که میدان مغناطیسی حدود ۵۴ درصد خیز دینامیکی

امروزه مدل‌های مکانیک پیوسته به طور وسیعی برای مدل سازی ریاضی سازه‌ها کاربرد دارد. اما در زمینه مدل سازی ریاضی المان‌های بتنی مورد استفاده در سازه‌ها همانند تیرها و ستون‌ها، با استفاده از روش انرژی مبتنی بر تئوری الاستیسیته، پژوهش‌های محدودی انجام شده است. جعفریان آرانی و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۱] کمانش تیرهای بتنی تقویت شده با نانولوله‌های کربنی را با تئوری‌های تیر اویلر-برنولی و تیموشنکو شبیه سازی کردند. با استفاده از تئوری مقاله قبل، صفری بیلویی و همکاران [۲] به تحلیل کمانش

* نویسنده عهده دار مکاتبات: mahmood.rabanibidgoli@iau.ac.ir



قرار دادند. آنها از روش آزمایشگاهی برای این کار استفاده کرده و نتیجه گرفتند که سرعت و جابجایی اولیه غیر صفر تاثیر شایانی در روی تحلیل دینامیکی سازه دارد.

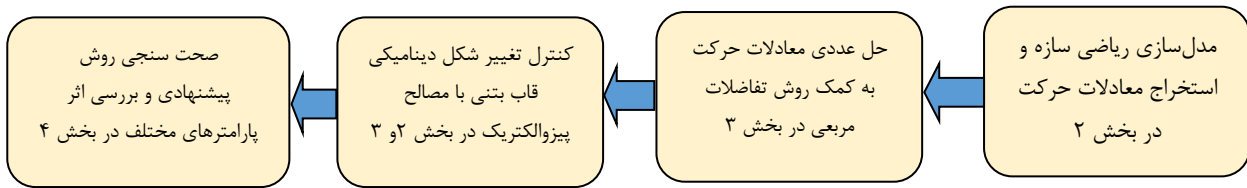
در پژوهش‌های اشاره شده قبلی، مبحث هوشمندسازی سازه مطرح نبوده است. امروزه استفاده از مواد هوشمند در سازه‌های بتنی و سایر سازه‌ها، یکی از موضوعات و ایده‌های جدیدی است که بسیاری از محققان به دنبال آن هستند. به کمک این مواد می‌توان رفتار دینامیکی یک سازه را کنترل نموده و از آسیب و گسیختگی آن جلوگیری نمود. تژو و گادره [۱۹] پوسته‌های استوانه‌ای پوشش داده شده با لایه‌های پیزوالکتریک را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش از تئوری برشی مرتبه بالا برای بدست آوردن معادلات حاکم استفاده شد. شنگ و وانگ [۲۰] به تحلیل کماتش و ارتعاشات ترمومکانیکی پوسته‌های استوانه‌ای پیزوالکتریک پرداختند. آنها از تئوری میندیلین برای بدست آوردن معادلات حاکم بر سازه استفاده نموده و به کمک یک روش تحلیلی به محاسبه بار کماتشی و فرکانس سیستم پرداختند. ارتعاشات آزاد پوسته‌های استوانه‌ای جداسازی شده با لایه‌های پیزوالکتریک در حالت سه بعدی توسط علی بیگلو و کانی تحلیل [۲۱] گردید. در این کار از روش تفاضلات مربعی برای بدست آوردن فرکانس سازه استفاده شد. حسینی هاشمی و همکاران در سال ۱۳۹۰ به بررسی استفاده از مواد پیزوالکتریک در صنعت حمل و نقل پرداختند [۲۲]. در این تحقیق، پس از معرفی انواع مواد هوشمند و ارائه ویژگی‌های آنها، مزیت‌های استفاده از مواد پیزوالکتریک نسبت به سایر مواد هوشمند در جهت تشخیص قابلیت اطمینان و مودهای شکست در صنعت حمل و نقل ارائه گردید. که و همکاران [۲۳] ارتعاشات غیرخطی نانوتیرهای پیزوالکتریک را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با در نظر گرفتن این‌که نانوتیر در راستای ضخامت قطبی شده است، با اعمال ولتاژ مناسب رفتار ارتعاشی تیر را به کنترل در آوردند. بوداقی و شاکری [۲۴]، ارتعاشات آزاد و پاسخ دینامیکی یک پل دو سر مفصل ساخته شده از مواد مدرج تابعی پیزوالکتریک را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در معادلات کرنش- تغییر مکان، اثرات برش را نیز در نظر گرفتند. علی بیگلو و همکاران [۲۵] با استفاده از تئوری سه بعدی الاستیسیته، ارتعاشات آزاد یک پوسته‌ی استوانه‌ای ساخته شده از مواد مدرج تابعی در بستر لایه‌های پیزوالکتریک را تحلیل کردند. عرب در سال ۱۳۹۲ به تحلیل کنترل ارتعاشات پوسته‌ها با مصالح پیزوالکتریک پرداخت [۲۶]. در این پژوهش، با نوشتن روابط انرژی پتانسیل، انرژی جنبشی و کار مجازی، ماتریس جرمی و سختی المان پوسته و سپس معادلات حاکم بدست آمد و در نهایت با استفاده از روش

سازه را کاهش می‌دهد. شریفی و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۶] به بررسی خیز دینامیکی ناشی از بار لرزه‌ای در تیرهای بتنی حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم پرداختند. تحلیل دینامیکی تیرهای بتنی حاوی نانوذرات تحت بار انفجاری توسط عزمی و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۹ انجام شد. آنها از تئوری سینوسی برشی برای مدل کردن سازه استفاده نموده و نشان دادند که وجود نانوذرات، خیز دینامیکی سازه را کاهش می‌دهد.

در زمینه تحلیل رفتار دینامیکی قاب‌های بتنی، لیو و ژانگ [۸] رفتار لرزه‌ای قاب‌های نزدیک گسل به دلیل رانش گسل را با استفاده از روش موج خمشی و مدل ویسکوالاستیک تحلیل نمودند. تحلیل دینامیکی ناشی از باد و زلزله روی قاب‌های فولادی تحت آتش توسط مازا [۹] انجام شد. از نتایج مهم این کار آن بود که قاب تحت دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد دچار آسیب می‌شود. پاولتره و همکاران [۱۰] به تعیین و تخمین آسیب لرزه‌ای در قاب‌های بتنی با مقاومت بالا پرداختند. لارسن و همکاران [۱۱] به بررسی احتمال تخریب قاب‌های بتنی تحت زلزله پرداخته و به این نتیجه رسیدند که محصور کردن سازه می‌تواند تا ۱۲ درصد این خطر را کاهش دهد. سید و همکاران [۱۲] مقاومت لرزه‌ای قاب بتنی تقویت شده با میلگرد تحت بارهای ناگهانی انفجاری در یک ساختمان واقع در ابوظبی را بررسی نمودند. تحلیل تاریخچه زمانی قاب‌های بتنی با طبقات نرم در طبقات سوم، ششم، نهم و دوازدهم توسط محمود و همکاران [۱۳] انجام شد. سیپوس و همکاران [۱۴] به تقویت قاب‌های بتنی با استفاده از تراشه‌های سنگ در برابر بار لرزه‌ای پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که تعداد طبقات، نسبت سطح قاب تقویت شده به سطح کل طبقه و تغییرات شتاب زمین پارامترهای تاثیرگذار روی اثر بار لرزه‌ای بر سازه بتنی هستند. ونگ و همکاران [۱۵] به تحلیل دینامیکی و میرایی غیرخطی قاب‌های بتنی تحت بار لرزه‌ای پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که وجود میراگر می‌تواند نسبت میرایی سازه را تا ۴۵ درصد افزایش دهد. آسیب و خرابی در قاب‌های بتنی با استفاده از الگوریتم وزنی توسط سو و همکاران [۱۶] مورد بررسی قرار گرفت. آنها با چینش میلگردها در قاب، نتیجه گرفتند که قاب بتنی می‌تواند تا حدود ۸ برابر مقاومت طراحی، در برابر آسیب و گسیختگی تحمل داشته باشد. تحلیل دینامیکی قاب‌های بتنی شامل کامپوزیت‌های سیمانی ساده و انعطاف پذیر توسط یو و همکاران [۱۷] انجام شد. آنها اثبات کردند که مقاومت لرزه‌ای سازه شامل کامپوزیت‌های سیمانی ساده و انعطاف پذیر بهتر از قاب بتنی معمولی می‌باشد. شا و همکاران [۱۸] تحلیل دینامیکی و شبه استاتیکی قاب‌های بتنی پیش ساخته با اتصالات خشک با کارایی بالا را مورد بررسی

آوردن معادلات حاکم از تئوری کلاسیک پوسته‌های استوانه‌ای و روابط کرنش تغییر مکان دائل-ون کارمن استفاده کردند. سلیم و همکاران، کنترل ارتعاشات فعال صفحات کامپوزیتی تقویت شده با لایه‌های پیزوالکتریک براساس تئوری تغییر شکل برشی ردی را مورد بررسی قرار دادند [۳۴]. در این تحقیق، یک مدل بدون شبکه ریتز بر اساس تئوری تغییر شکل برشی ارائه شده است. همچنین ویژگی‌های مواد موثر صفحات بوسیله روش موری تاناکا محاسبه شدند. ایشان برای کنترل ارتعاشات صفحات کامپوزیتی، دو سنسور پیزوالکتریک برای کنترل ارتعاشات آزاد در نظر گرفتند. لی و همکاران کنترل ارتعاشات تصادفی صفحات چندلایه کامپوزیتی تقویت شده بوسیله فیبر پیزوالکتریک را مورد بررسی قرار دادند [۳۵]. در تحقیق ایشان، با استفاده از اصل همپلتون و روش ریلی ریتز، تاثیر الیاف پیزوالکتریک بر کاهش ارتعاشات تصادفی بدست آمده است. علی‌بیگلو [۳۶] به تحلیل ترموالاستیک پنل‌های استوانه‌ای کامپوزیت تقویت شده با نانولوله‌های کربنی به صورت مدرج تابعی قرار گرفته در لایه‌های پیزوالکتریک پرداختند. ایشان تنش‌های حرارتی ایجاد شده در ورق را به دست آورده و اثرات درصد حجمی نانولوله‌های کربنی بر آن را بررسی نمودند. براتی و همکاران، کماتش ورق‌های پیزوالکتریک هوشمند واقع بر فونداسیون‌های الاستیک را بررسی نمودند [۳۷]. در این تحقیق، با در نظر گرفتن اثرات تغییر شکل برشی، خصوصیات مواد الکترواستاتیک در جهت عرضی ورق براساس قانون توانی و استفاده از اصل همپلتون، مودهای کماتشی ورق برای شرایط مرزی مختلف بدست آمد. کریمی و همکاران [۳۸]، در سال ۱۳۹۵ به تحلیل مقدار انرژی برداشت شده ناشی از عبور وسایل نقلیه روی یک پل دارای وصله پیزوالکتریک به روش تئوری و تجربی پرداختند. در این تحقیق، برداشت انرژی از پل تحت عبور جرم‌های متوالی بررسی شد. برداشت کننده شامل یک تیر طره با وصله پیزوالکتریک و جرم اضافی بود که در وسط پل نصب شده بود. بدین منظور، معادله حاکم بر پل دو سر مفصل با استفاده از تئوری برنولی و تحت عبور جرم‌های متوالی و برداشت‌کننده انرژی استخراج شد. نتایج نشان داد که با توجه به شرایط مرزی دو سر مفصل پل، وسط پل که در مود اول، بیشترین مقدار دامنه را دارد، محل بهینه برای قرارگیری وصله پیزوالکتریک می‌باشد. کولینسکی و پرژیبیلیسکی [۳۹] اثر هوشمندی را روی ارتعاشات عرضی و کماتش تیرهای با سطح مقطع متغییر مورد بررسی قرار دادند. آنها از روش عددی برای بدست آوردن فرکانس و بار کماتشی سازه استفاده کردند. پرژیبیلیسکی و گاسیورسکی [۴۰] ارتعاشات غیر خطی تیرهای الاستیک با لایه پیزوالکتریک را تحلیل نمودند. بطحایی و همکاران [۴۱]،

کنترل پس‌خور سرعت و هم‌چنین کنترلر تناسبی - انتگرالی - مشتقی، مقدار میرایی نوسانات یک سازه کنترل نشده تحت آزمایش دینامیکی با استفاده از مواد پیزوالکتریک بررسی گردید. ینگ و همکاران [۲۷] یک روش تحلیلی برای تحلیل کماتش پوسته‌های استوانه‌ای با ضخامت متغیر ارائه کردند. یاکوب یاسین و کاپوریا [۲۸] با استفاده از روش المان محدود، به مطالعه پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی و ساندویچی پیزوالکتریک پرداختند. در این تحقیق، از تئوری زیگزاگ جهت افزایش دقت محاسبات استفاده شد. لپتین و موروزو [۲۹] به بررسی رفتار کماتشی یک پوسته‌ی استوانه‌ای ساندویچی تحت فشار خارجی پرداختند. آنها با استفاده از روش گالرکین به حل معادلات حاکم برای پوسته‌ی استوانه‌ای دو سر مفصل پرداختند. قاسمی و جامی الاحمدی [۳۰] در سال ۱۳۹۴، رفتار کماتشی ورق‌های مدرج تابعی دارای لایه‌ی پیزوالکتریک را با تئوری‌های برشی مرتبه بالای تغییر مکان تحلیل نمودند. بدین منظور، معادلات حاکم بر ورق دارای لایه پیزو، با استفاده از اصل حداقل انرژی پتانسیل و معادله ماکسول استخراج و با فرض تکیه‌گاه ساده روی هر چهار لبه ورق به صورت تحلیلی حل شده و بارهای بحرانی کماتش به دست آمدند. اثر پارامترهای مختلف مانند توان ماده مدرج تابعی، نسبت ابعادی ورق، ضخامت لایه‌های پیزوالکتریک، ضخامت ورق، حالت‌های مدار باز و مدار بسته، شرایط بارگذاری و نوع ماده پیزوالکتریک بر بار بحرانی کماتش بررسی گردید. نتایج نشان داد که با ازدیاد ضخامت لایه پیزوالکتریک، بار بحرانی کماتش ورق افزایش می‌یابد. رفتار کماتشی یک پوسته‌ی استوانه‌ای ساخته شده از مواد مدرج تابعی تحت بار محوری تقویت شده در راستاهای طولی و محوری توسط فراهانی و همکاران [۳۱] مورد مطالعه قرار گرفت. آنها فرض کردند که خواص پوسته در راستای ضخامت پوسته به طور پیوسته تغییر کرده و برای بدست آوردن روابط اساسی و معادلات پایداری و تعادل از تئوری تغییر شکل مرتبه سوم برشی استفاده کردند. هم‌چنین برای حل معادلات حاکم و بدست آوردن بار کماتش بحرانی با در نظر گرفتن شرایط مرزی دو سر مفصل، یک حل بسته ارائه کردند. ایشان نشان دادند که پارامتر ناهمگنی، هندسه‌ی پوسته و تعداد تقویت‌های استفاده شده تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر بار کماتش بحرانی پوسته دارد. لی و همکاران [۳۲] تحلیل دینامیکی پنل‌های تقویت شده با نانولوله‌های کربنی چیده شده به صورت مدرج تابعی را مورد بررسی قرار دادند. لی و کیائو [۳۳] به بررسی رفتار کماتش و بعد از کماتش پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار خارجی و فشار محوری پرداختند. آنها فرض کردند که پوسته‌ی استوانه‌ای در یک میدان حرارتی قرار گرفته است. هم‌چنین، برای بدست



و حل آن با روش عددی تفاضلات مربعی انجام نشده است. از مزایای دیگر پژوهش حاضر، استفاده از روش عددی تفاضلات مربعی به همراه روش نیومارک جهت حل معادلات حاکم بوده که دارای سرعت همگرایی بسیار بالا و زمان تحلیل بسیار کوتاه می باشد که نسبت به استفاده از روش اجزا محدود در مسائل کنترل فعال سازه بسیار مطلوب می باشد. فلوچارت نمایش روند پژوهش به فرم زیر می باشد:

۲- مدل سازی ریاضی

پیکربندی شماتیک قاب بتنی با کنترل کننده پیزوالکتریک در شکل (۱) نشان داده شده است. این شکل، یک قاب بتنی یک دهانه به طول تیر L_1 ، طول ستون های $L_2 = L_3$ ، ضخامت بتن h_c و ضخامت لایه های پیزوالکتریک h_p را نشان می دهد. تیر و ستون قاب بتنی با دو لایه پیزوالکتریک پوشش داده شده است که یکی نقش محرک و دیگری نقش سنسور را دارد. سیگنال خروجی از سنسور وارد کنترل کننده تناسبی-مشتقی (PD) شده و بعد از اصلاح سیگنال توسط محرک به سازه وارد می شود. محورهای مختصات تیر با X_1 و Z_1 به ترتیب در راستای طولی و ضخامت، و محورهای مختصات ستون ها با X_2, X_3, Z_2, Z_3 به ترتیب در راستای طولی و ضخامت نشان داده شده است. قاب در روی تکیه گاه واقع شده و تحت بار لرزه ای قرار دارد.

با استفاده از تئوری تیر برشی هایپربولیک، میدان جابجایی بصورت زیر می باشد [۴۵]:

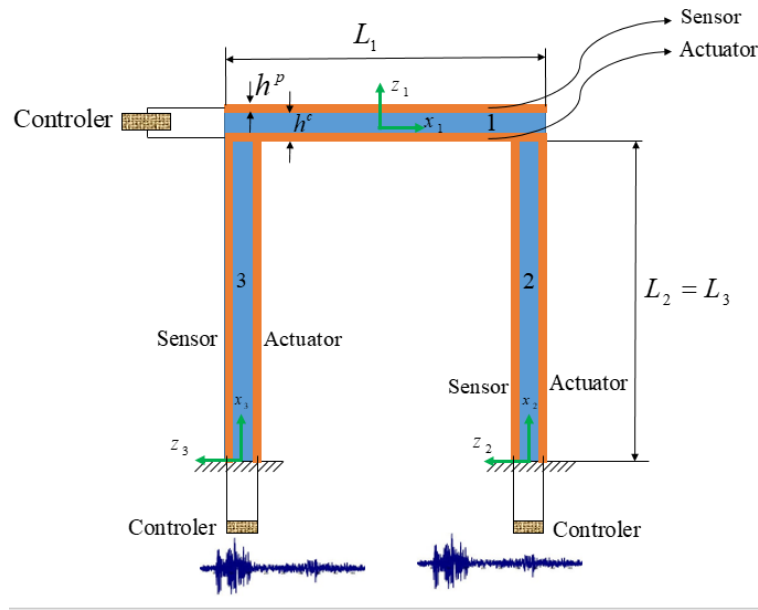
$$u_1(x, z, t) = u(x, t) - z \frac{\partial w(x, t)}{\partial x} + f \psi(x, t), \quad (1)$$

$$u_2(x, z, t) = 0. \quad (2)$$

$$u_3(x, z, t) = w(x, t). \quad (3)$$

در سال ۱۳۹۷ به تحلیل عملکرد کنترل نیمه فعال یک سازه ۵ طبقه به کمک عملگرهای پیزوالکتریک نصب شده بر روی میراگر اصطکاکی مطابق الگوریتم کنترل منطق فازی پرداختند. ایشان استنتاج نمودند که برای زلزله های حوزه دور، استفاده از عملگر پیزوالکتریک، حدود ۱۰/۵ درصد در مقدار برش پایه و حدود ۱۱ درصد در مقدار تغییر مکان نتایج بهتری به همراه دارد. نینه و همکارانش [۴۲] به تحلیل ارتعاشات صفحه های جدار ضخیم پوشیده شده با لایه های پیزوالکتریک پرداختند. آنها از لایه های پیزوالکتریک به منظور کنترل سازه استفاده نمودند. پدرل و همکاران [۴۳] به کنترل تیرهای نازک کوپل شده با لایه های پیزوالکتریک پرداختند. ژانگ و کی [۴۴] به تحلیل ارتعاشات، کمانش و خمش ورق های گرد پوشش داده شده با لایه های پیزوالکتریک پرداختند. آنها از روش عددی تفاضلات مکعبی برای حل معادلات حاکم استفاده نمودند.

با توجه به جستجو در ادبیات فنی، تحلیل و کنترل پاسخ دینامیکی قاب های بتنی با لایه پیزوالکتریک به عنوان محرک و سنسور تحت اثر زلزله بر مبنای روش انرژی و استفاده از روش عددی تفاضلات مربعی انجام نشده است. لذا، در این مقاله، پاسخ دینامیکی قاب بتنی پوشش داده شده با یک لایه هوشمند برای کنترل رفتار دینامیکی سازه تحت اثر زلزله به صورت عددی تحلیل می شود. بدین منظور، برای مدل سازی ریاضی سازه از تئوری تغییر شکل برشی تیر استفاده شده و به کمک روش انرژی و اصل همپلتون، معادلات حاکم با در نظر گرفتن لایه پیزو استخراج می گردند. در نهایت با استفاده از حل عددی، تغییر شکل دینامیکی جانبی و قائم سیستم محاسبه شده و به بررسی اثر پارامترهایی همچون وجود و محل لایه پیزوالکتریک، ضخامت لایه پیزوالکتریک، ولتاژ اعمالی به لایه پیزوالکتریک، اثر کنترلی لایه پیزوالکتریک و شرایط مرزی روی پاسخ لرزه ای قاب پرداخته می شود. همچنین، جهت کنترل تغییر شکل قاب از یک لایه محرک و یک لایه سنسور بر روی اجزا قاب یعنی تیر و ستون ها در حالات مختلف استفاده شده است در حالی که در پژوهش های دیگر از لایه پیزو فقط بر روی المان تیر یا ستون و به صورت محدود استفاده شده و تاکنون کنترل رفتار لرزه ای قاب با لایه پیزوالکتریک و استخراج معادلات حاکم مربوطه با روش انرژی



شکل ۱. شماتیک قاب بتنی پوشش داده شده با لایه های پیزوالکتریک به عنوان محرک و سنسور

Fig. 1. Schematic of the concrete frame covered with piezoelectric layers as actuator and sensor

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx}^p \\ \sigma_{yy}^p \\ \sigma_{zz}^p \\ \tau_{yz}^p \\ \tau_{xz}^p \\ \tau_{xy}^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{13} & Q_{23} & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{32} \\ 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & e_{24} & 0 \\ e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{Bmatrix} \quad (6)$$

درحالی که u_1 ، u_2 و u_3 ، جابجایی نقاط صفحه میانی در راستای طولی، عرضی و ضخامت هستند. همچنین $f = h \sinh\left(\frac{z}{h}\right) - z \cosh\left(\frac{z}{2}\right)$ ، بوده و ψ بیانگر چرخش سطح مقطع، حول محور y می باشد. با جایگذاری روابط (۱) تا (۳) در روابط کرنش، معادلات کرنش- تغییر مکان سازه به صورت زیر نوشته می شوند:

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{24} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{Bmatrix}, \quad (7)$$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + f \frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{xz} = \cosh\left(\frac{z}{h}\right) \psi. \quad (5)$$

در، روابط فوق Q_{ij} ، e_{ij} و ε_{ij} ، به ترتیب ثوابت الاستیک، پیزوالکتریک و دی الکتریک می باشند. همچنین، میدان الکتریکی E_k بر حسب پتانسیل الکتریکی به صورت زیر تعریف می گردد [۴۶]:

$$E_k = -\nabla \Phi. \quad (8)$$

هنگامی که بر مواد پیزوالکتریک، تنش مکانیکی اعمال شود، این امر، موجب ایجاد میدان الکتریکی، در این مواد می شود. به طور عکس، نیز، اعمال یک میدان الکتریکی، موجب ایجاد کرنش مکانیکی، در این گونه مواد می شود. در اینگونه مواد، تنش ها (σ) و کرنش ها (ε)، با جابجایی الکتریکی (D) و میدان الکتریکی (E) از دیدگاه الکترواستاتیک و مکانیک سازه به طریق زیر کوپل می شوند [۴۶]:

$$\sigma_{xz}^c = C_{55} \varepsilon_{xz}, \quad (17)$$

در این مقاله، توزیع پتانسیل الکتریکی به صورت زیر در نظر گرفته شده است [۴۷]:

$$\Phi(x, z, t) = -\cos\left(\frac{\pi z}{h}\right)\phi(x, t) + \frac{2V_0 z}{h}, \quad (9)$$

در، روابط فوق C_{ij} ثوابت الاستیک بتن می‌باشند. انرژی پتانسیل سازه، با در نظر گرفتن میدان الکتریکی بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$U = \frac{1}{2} \int_V (\sigma_{xx}^c \varepsilon_{xx} + \sigma_{xz}^c \varepsilon_{xz} + \sigma_{xx}^p \varepsilon_{xx} + \sigma_{xz}^p \varepsilon_{xz} - D_x E_x - D_z E_z) dV \quad (18)$$

که V_0 ، ولتاژ خارجی اعمالی بر سازه، در راستای طولی می‌باشد. بنابراین، میدان الکتریکی در دو راستا به صورت زیر بدست می‌آید:

$$E_x = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right) \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad (10)$$

با جایگذاری روابط (۴)، (۵)، (۱۰) و (۱۱) در رابطه (۱۸)، انرژی پتانسیل به صورت زیر در می‌آید:

$$U = \frac{1}{2} \int_V \left((\sigma_{xx}^c + \sigma_{xx}^p) \left(\frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + f \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + (\sigma_{xz}^c + \sigma_{xz}^p) \left(\frac{\partial f}{\partial z} - \psi \right) - D_x \left(\cos\left(\frac{\pi z}{h}\right) \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - D_z \left(-\frac{\pi}{h} \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right) \phi - \frac{2V_0}{h} \right) \right) dV. \quad (19)$$

$$E_z = -\frac{\partial \Phi}{\partial z} = -\frac{\pi}{h} \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right) \phi - \frac{2V_0}{h}. \quad (11)$$

با تعریف نیرو و ممان‌های درون صفحه‌ای به صورت زیر:

با توجه به تئوری برشی هایپربولیک، روابط کوپل الکترومکانیکی برای لایه پیزوالکتریک، به صورت زیر خلاصه می‌شوند [۲۰]:

$$(N_x, M_x, P_x) = \int_{A^c} (1, z, f) \sigma_{xx}^c dA^c + \int_{A^p} (1, z, f) \sigma_{xx}^p dA^p, \quad (20)$$

$$\sigma_{xx}^p = Q_{11} \varepsilon_{xx} + e_{31} \left(\frac{\pi}{h} \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right) \phi + \frac{2V_0}{h} \right). \quad (12)$$

$$Q_x = \int_{A^c} \frac{\partial f}{\partial z} \sigma_{xz}^c dA^c + \int_{A^p} \frac{\partial f}{\partial z} \sigma_{xz}^p dA^p. \quad (21)$$

$$\sigma_{xz}^p = Q_{55} \varepsilon_{xz} - e_{15} \left(\cos\left(\frac{\pi z}{h}\right) \frac{\partial \phi}{\partial x} \right), \quad (13)$$

انرژی پتانسیل، به صورت زیر ساده می‌شود:

$$U = \int_x \left(N_x \frac{\partial u}{\partial x} - M_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + P_x \frac{\partial \psi}{\partial x} + Q_x \psi \right) dx \quad (22)$$

$$D_x = e_{15} \varepsilon_{xz} + \epsilon_{11} \left(\cos\left(\frac{\pi z}{h}\right) \frac{\partial \phi}{\partial x} \right), \quad (14)$$

همچنین، انرژی جنبشی سازه عبارت است از:

$$D_z = e_{31} \varepsilon_{xx} - \epsilon_{33} \left(\frac{\pi}{h} \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right) \phi + \frac{2V_0}{h} \right), \quad (15)$$

$$+ \int_V \left(-D_x \left(\cos\left(\frac{\pi z}{h}\right) \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) - D_z \left(-\frac{\pi}{h} \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right) \phi - \frac{2V_0}{h} \right) \right) dV. \quad (23)$$

برای تیرهای بتنی، با حذف ضرایب پیزوالکتریک، روابط تنش-کرنش عبارتند از:

در رابطه بالا ρ دانسیته مصالح قاب می‌باشد. با جایگذاری رابطه (۱)

$$\sigma_{xx}^c = C_{11} \varepsilon_{xx}, \quad (16)$$

تا (۳) در معادله بالا داریم:

$$\delta u_1 : (Q_{11}A^p + C_{11}A^c) \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} = I_0 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} + ma_u(t), \quad (31)$$

$$\delta w_1 : -(Q_{11}I^p + C_{11}I^c) \frac{\partial^3 w_1}{\partial x_1^3} + \frac{24(Q_{11}I^p + C_{11}I^c)}{\pi^3} \frac{\partial^3 \psi_1}{\partial x_1^3} - (2e_3V_0) \frac{\partial^2 w_1}{\partial x_1^2} = I_0 \frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2} + \frac{24I_2}{\pi^3} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial x_1 \partial t} - I_2 \frac{\partial^4 w_1}{\partial x_1^2 \partial t^2} + ma_w(t), \quad (32)$$

$$\delta \psi_1 : -\frac{24(Q_{11}I^p + C_{11}I^c)}{\pi^3} \frac{\partial^3 w_1}{\partial x_1^3} + \frac{6(Q_{11}I^p + C_{11}I^c)}{\pi^2} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial x_1^2} + \frac{e_{31}h}{2} \frac{\partial \phi_1}{\partial x} - \frac{(Q_{55}A^p + C_{55}A^c)}{2} \psi_1 + \frac{e_{15}h}{2} \frac{\partial \phi_1}{\partial x} = \frac{6I_2}{\pi^2} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial t^2} - \frac{24I_2}{\pi^3} \frac{\partial^2 w_1}{\partial x_1 \partial t}, \quad (33)$$

$$\delta \phi_1 : -\frac{2h^p}{\pi} \frac{\partial^2 w_1}{\partial x_1^2} + \frac{h^p}{2} \frac{\partial \psi_1}{\partial x_1} - \frac{\pi^2 \epsilon_{33}}{2h^p} \phi_1 + \frac{h^p}{2} \frac{\partial \psi_1}{\partial x_1} + \frac{h^p \epsilon_{11}}{2} \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial x_1^2} = 0. \quad (34)$$

با در نظر گرفتن نیروی وزن ستون‌ها و لایه پیزوالکتریک برای آن‌ها،

معادلات حاکم بر ستون‌های قائم بتنی عبارت است از:

$$\delta u_i : (Q_{11}A^p + C_{11}A^c) \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2} = I_0 \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} + ma_u(t), \quad (35)$$

$$\delta w_i : -(Q_{11}I^p + C_{11}I^c) \frac{\partial^3 w_i}{\partial x_i^3} + \frac{24(Q_{11}I^p + C_{11}I^c)}{\pi^3} \frac{\partial^3 \psi_i}{\partial x_i^3} - \rho^c g A^c \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(L-x) \frac{\partial w_i}{\partial x_i} \right] - (2e_3V_0) \frac{\partial^2 w_i}{\partial x_i^2} = I_0 \frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2} + \frac{24I_2}{\pi^3} \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x_i \partial t} - I_2 \frac{\partial^4 w_i}{\partial x_i^2 \partial t^2} + ma_w(t), \quad (36)$$

$$\delta \psi_i : -\frac{24(Q_{11}I^p + C_{11}I^c)}{\pi^3} \frac{\partial^3 w_i}{\partial x_i^3} + \frac{6(Q_{11}I^p + C_{11}I^c)}{\pi^2} \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial x_i^2} + \frac{e_{31}h}{2} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} - \frac{(Q_{55}A^p + C_{55}A^c)}{2} \psi_i + \frac{e_{15}h}{2} \frac{\partial \phi_i}{\partial x} = \frac{6I_2}{\pi^2} \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial t^2} - \frac{24I_2}{\pi^3} \frac{\partial^2 w_i}{\partial x_i \partial t}, \quad (37)$$

$$\delta \phi_i : -\frac{2h^p}{\pi} \frac{\partial^2 w_i}{\partial x_i^2} + \frac{h^p}{2} \frac{\partial \psi_i}{\partial x_i} - \frac{\pi^2 \epsilon_{33}}{2h^p} \phi_i + \frac{h^p}{2} \frac{\partial \psi_i}{\partial x_i} + \frac{h^p \epsilon_{11}}{2} \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x_i^2} = 0. \quad (38)$$

$$\phi^{(a)} = G_d \phi^{(s)} + G_v \dot{\phi}^{(s)},$$

به منظور کنترل رفتار دینامیکی سازه، از یک کنترل کننده تناسبی-مشتقی استفاده می‌شود. بنابراین پتانسیل الکتریکی لایه محرک بر حسب

$$K = \int \left[I_0 \left(\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right) + I_2 \left(\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} \right)^2 - \frac{24}{\pi^3} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial \psi}{\partial t} - \frac{24}{\pi^3} \frac{\partial w}{\partial t} \frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{6}{\pi^2} \left(\frac{\partial \psi}{\partial t} \right)^2 \right) \right] dx \quad (24)$$

در ادامه، کار خارجی ناشی از نیروی زلزله مطابق با رابطه زیر بدست

می‌آید:

$$W = \int (ma_w(t)u_3 + ma_u(t)u_1) dA, \quad (25)$$

در رابطه فوق، m و $a(t)$ ، به ترتیب جرم بر واحد طول و شتاب سازه

می‌باشند. اصل همیلتون به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\int_0^t (\delta U - \delta K - \delta W) dt = 0, \quad (26)$$

در روابط بالا δ ، بیانگر تغییرات انرژی‌های سیستم می‌باشد. حال، با

جایگذاری معادله‌های انرژی در رابطه (۲۶)، روابط متشکله عبارتند از:

$$\delta u_1 : \frac{\partial N_{x1}}{\partial x_1} = I_0 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} + ma_u(t), \quad (27)$$

$$\delta w_1 : \frac{\partial^2 M_{x1}}{\partial x_1^2} = I_0 \frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2} + \frac{24I_2}{\pi^3} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial x_1 \partial t} - I_2 \frac{\partial^4 w_1}{\partial x_1^2 \partial t^2} + ma_w(t), \quad (28)$$

$$\delta \psi_1 : \frac{\partial P_{x1}}{\partial x_1} - Q_{x1} = \frac{6I_2}{\pi^2} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial t^2} - \frac{24I_2}{\pi^3} \frac{\partial^2 w_1}{\partial x_1 \partial t}. \quad (29)$$

$$\delta \phi : \int_{-h/2}^{h/2} \left(\frac{D_x \pi}{h} \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right) + \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right) \frac{\partial D_x}{\partial x} \right) dz = 0. \quad (30)$$

با جایگذاری معادله‌های (۱۲) تا (۱۵)، در روابط (۲۰) و (۲۱)، روابط

نیروها و ممان‌های داخلی تیر را می‌توان، به صورت زیر محاسبه کرد:

پتانسیل الکتریکی سنسور به صورت زیر می‌تواند نوشته شود:

شرایط مرزی پیوستگی بین تیرها عبارت است از:

$$\begin{cases} w_1 = u_2 \\ u_1 = w_2 \\ M_{x_1} = M_{x_2} \\ N_{x_1} = N_{x_2} \end{cases} @ x_2 = L_2 \text{ and } x_1 = L_1 / 2 \quad (45)$$

$$\phi^{(a)} = G_d \phi^{(s)} + G_v \dot{\phi}^{(s)}, \quad (39)$$

در رابطه فوق G_d و G_v به ترتیب ضرایب کنترل تناسبی و مشتقی می‌باشند و بالانویس‌های a و s به ترتیب پتانسیل الکتریکی لایه محرک و سنسور را نشان می‌دهند. بنابراین با جایگذاری پتانسیل الکتریکی بدست آمده از لایه پیزوالکتریک بالا که در نقش سنسور است (معادله‌های (۳۴) برای تیر بتنی و (۳۸) برای ستون بتنی) در معادله (۳۹) داریم:

$$\begin{cases} w_1 = u_3 \\ u_1 = w_3 \\ M_{x_1} = M_{x_3} \\ N_{x_1} = N_{x_3} \end{cases} @ x_3 = L_3 \text{ and } x_1 = -L_1 / 2 \quad (46)$$

$$+G_v \left(-\frac{2h^p}{\pi} \frac{\partial^3 w_1}{\partial t \partial x_1^2} + \frac{h^p}{2} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial t \partial x_1} - \frac{\pi^2 \epsilon_{33}}{2h^p} \frac{\partial \phi_1}{\partial t} + \frac{h^p}{2} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial t \partial x_1} + \frac{h^p \epsilon_{11}}{2} \frac{\partial^3 \phi_1}{\partial t \partial x_1^2} \right), \quad (40)$$

$$\phi_{column}^{(a)} = G_d \left(-\frac{2h^p}{\pi} \frac{\partial^3 w_i}{\partial x_i^2} + \frac{h^p}{2} \frac{\partial \psi_i}{\partial x_i} - \frac{\pi^2 \epsilon_{33}}{2h^p} \phi_i + \frac{h^p}{2} \frac{\partial \psi_i}{\partial x_i} + \frac{h^p \epsilon_{11}}{2} \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x_i^2} \right)$$

$$+G_v \left(-\frac{2h^p}{\pi} \frac{\partial^3 w_i}{\partial t \partial x_i^2} + \frac{h^p}{2} \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial t \partial x_i} - \frac{\pi^2 \epsilon_{33}}{2h^p} \frac{\partial \phi_i}{\partial t} + \frac{h^p}{2} \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial t \partial x_i} + \frac{h^p \epsilon_{11}}{2} \frac{\partial^3 \phi_i}{\partial t \partial x_i^2} \right). \quad (41)$$

شرایط مرزی عمومی سازه عبارت است از:

۳- روش حل

روش تفاضلات مربعی^۱ از جمله روش‌های عددی است که در آن با استفاده از ضرایب وزنی، معادلات دیفرانسیلی حاکم، به دسته‌ای از معادلات جبری مرتبه اول تبدیل می‌شوند. بدین ترتیب که در هر نقطه، مشتق بصورت یک مجموع خطی از ضرایب وزنی و مقادیر تابع در آن نقطه و دیگر نقاط دامنه و در جهت محورهای مختصات بیان خواهند شد. قابل ذکر است که از این روش تاکنون برای تعیین تغییرشکل قاب استفاده نشده است. رابطه اصلی این روش برای حالت یک بعدی، به شکل زیر بیان می‌شود [۴۸]:

➤ گیردار-گیردار

$$\frac{df}{dx} \Big|_{x=x_i} \rightarrow \sum_{j=1}^N C_{ij} f_j \quad (47)$$

در رابطه فوق N تعداد نقاط نمونه و C_{ij} ضرایب وزنی برای بدست آوردن مشتق تابع در نقطه نمونه i ام است که بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} w_3 = 0, u_3 = 0, \frac{\partial w_3}{\partial x_3} = 0 & @ x_3 = 0 \\ w_2 = 0, u_2 = 0, \frac{\partial w_2}{\partial x_2} = 0 & @ x_2 = 0 \end{aligned} \quad (42)$$

➤ گیردار-ساده

$$X_i = \frac{L}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{i-1}{N_x-1} \pi \right) \right] \quad i = 1, \dots, N_x \quad (48)$$

$$\begin{aligned} w_2 = 0, u_2 = 0, \frac{\partial w_2}{\partial x_2} = 0 & @ x_2 = 0 \\ w_3 = 0, u_3 = 0, M_{x_3} = 0 & @ x_3 = 0 \end{aligned} \quad (43)$$

➤ ساده-ساده

$$C_{ij}^{(1)} = \frac{L_1(x_i)}{(x_i - x_j)L_1(x_j)} \quad \text{for } i \neq j, \quad i, j = 1, 2, \dots, N \quad (49)$$

$$\begin{aligned} w_2 = 0, u_2 = 0, M_{x_2} = 0 & @ x_2 = 0 \\ w_3 = 0, u_3 = 0, M_{x_3} = 0 & @ x_3 = 0 \end{aligned} \quad (44)$$

$$C_{ii}^{(1)} = - \sum_{j=1, j \neq i}^N C_{ij}^{(1)} \quad \text{for } i = j, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (50)$$

که در روابط فوق:

$$\alpha_0 = \frac{1}{\chi \Delta t^2}, \quad \alpha_1 = \frac{\gamma}{\chi \Delta t}, \quad \alpha_2 = \frac{1}{\chi \Delta t}, \quad \alpha_3 = \frac{1}{2\chi} - 1, \quad \alpha_4 = \frac{\gamma}{\chi} - 1, \quad (56)$$

$$\alpha_5 = \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\gamma}{\chi} - 2 \right), \quad \alpha_6 = \Delta t (1 - \gamma), \quad \alpha_7 = \Delta t \gamma.$$

$$M(x_i) = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_x} (x_i - x_j) \quad (51)$$

در روابط بالا $\gamma = 0.5$ و $\chi = 0.25$ می‌باشند. بر اساس روش تکرار، معادله اصلی روش در هر بازه زمانی حل شده و شتاب و سرعت اصلاح شده از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\ddot{d}_{i+1} = \alpha_0 (d_{i+1} - d_i) - \alpha_2 \dot{d}_i - \alpha_3 \ddot{d}_i, \quad (57)$$

$$\dot{d}_{i+1} = \dot{d}_i + \alpha_6 \ddot{d}_i + \alpha_7 \ddot{d}_{i+1}, \quad (58)$$

بنابراین معادلات حاکمه و شرط مرزی المان‌های قاب در فرم ماتریسی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\left[\begin{array}{c} [K]_{12N \times 12N} \\ [C]_{12N \times 12N} \\ [M]_{12N \times 12N} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \{d_b\}_{12N \times 1} \\ \{\dot{d}_d\}_{12N \times 1} \\ \{\ddot{d}_d\}_{12N \times 1} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \{0\}_{12N \times 1} \\ \{-Ma(t)\}_{12N \times 1} \end{array} \right\} \quad (52)$$

در رابطه فوق $[K]$ ، $[C]$ و $[M]$ به ترتیب بیانگر ماتریس سختی، ماتریس دمپ و ماتریس جرم می‌باشند. همچنین $\{d_b\}$ و $\{\dot{d}_d\}$ به ترتیب بردار تغییر شکل دینامیکی مربوط به نقاط شرط مرزی و میدان می‌باشند. در این قسمت، برای بدست آوردن پاسخ زمانی سازه تحت بار لرزه ای، روش عددی نیومارک [۴۹] در حوزه زمان بکار گرفته شده است. بر اساس این روش، معادله بالا به فرم کلی زیر نوشته می‌شود:

$$K^*(d_{i+1}) = Q_{i+1}, \quad (53)$$

به طوری که زیر نویس $i+1$ نشان دهنده زمان $t = t_{i+1}$ بوده، $K^*(d_{i+1})$ ماتریس سختی موثر و Q_{i+1} بردار بار موثر می‌باشند که به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$K^*(d_{i+1}) = K + \alpha_0 M + \alpha_1 C, \quad (54)$$

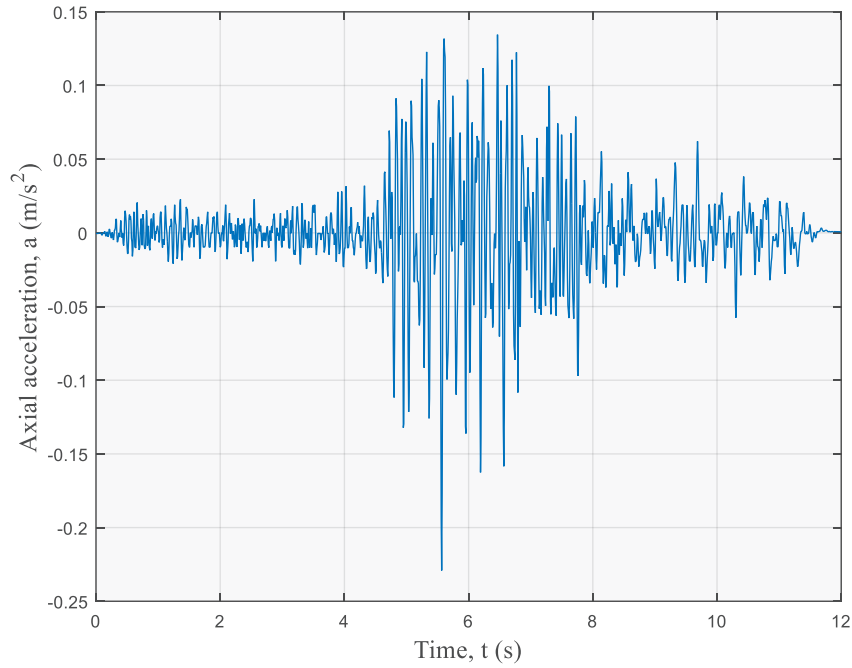
$$Q_{i+1}^* = F_{i+1} + M(\alpha_0 \ddot{d}_i + \alpha_2 \dot{d}_i + \alpha_3 \ddot{d}_i) + C(\alpha_0 \dot{d}_i + \alpha_2 \dot{d}_i + \alpha_3 \ddot{d}_i), \quad (55)$$

به طوری که

۴- نتایج و نمودارها

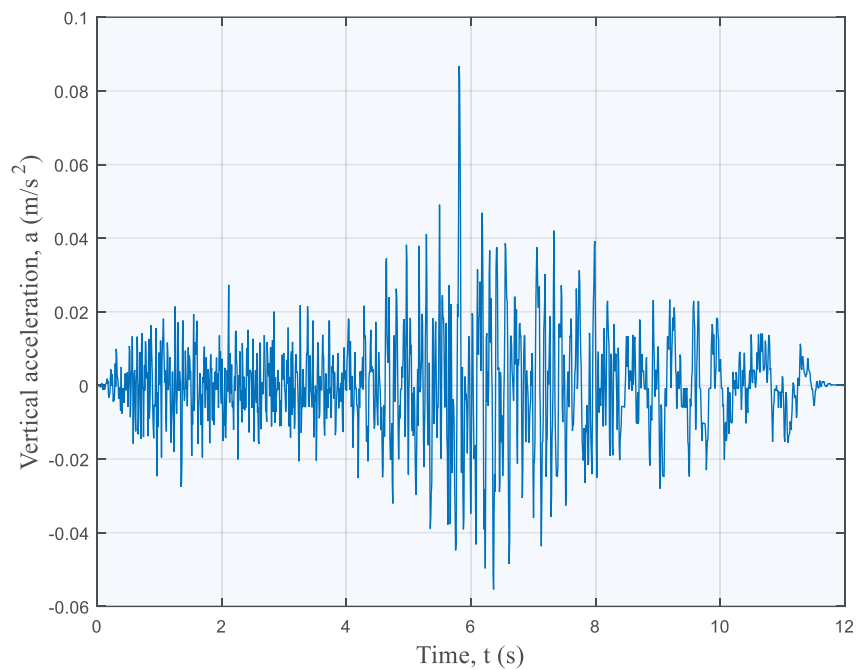
۴-۱- مشخصات قاب ولایه پیزوالکتریک

در این قسمت به بررسی تغییر شکل دینامیکی جانبی و خیز قائم تیر قاب بتنی با پوشش پیزوالکتریک تحت بار لرزه‌ای و کنترل آن پرداخته می‌شود. بدین منظور یک قاب بتنی با طول $L_1 = 5m$ و $L_2 = L_3 = 3m$ در نظر گرفته شده است. ضخامت بتن و لایه پیزوالکتریک به ترتیب $h^c = 30cm$ و $h^p = 3cm$ است. قاب بتنی دارای مدول الاستیک $E^c = 20GPa$ و ضریب پواسون می‌باشد. لایه پیزوالکتریک از جنس پلی وینیلیدن فلوراید (PVDF) با ضرایب الاستیک $Q_{11} = 8GPa$ و $Q_{55} = 1.8GPa$ ، ضرایب پیزوالکتریک $e_{31} = -0.51C/m^2$ و $e_{15} = -0.45C/m^2$ ، ضریب دی الکتریک $\epsilon_{15} = 7.77e-8F/m$ است. هدف این مقاله، مطالعه پارامتریک برای قاب بتنی هوشمند با کنترل کننده تناسبی-مشتقی است. بنابراین برای بررسی اثر پارامترهای مختلفی همچون وجود و ضخامت لایه پیزوالکتریک، کنترل کننده، ولتاژ خارجی، شرایط مرزی و اثرات ترکیبی آنها، یک شتاب نگاشت به عنوان ورودی مسئله در نظر گرفته شده است. شتاب نگاشت زلزله بم ایستگاه چشمه سبز در راستای طولی و قائم به ترتیب در شکل های (۲) و (۳) نشان داده شده است. زلزله در این ایستگاه دارای بیشینه شتاب 0.14 متر بر مجذور ثانیه، عرض جغرافیایی $29/31$ ، طول جغرافیایی $59/67$ ، عمق 50 کیلومتر و شدت $5/3$ ریشتر می باشد.



شکل ۲. مولفه شتاب‌نگاشت افقی زلزله ایستگاه چشمه سبز از شهر بم

Fig. 2. Horizontal component of acceleration time history for Bam earthquake recorded at Cheshme Sabz station



شکل ۳. مولفه شتاب‌نگاشت قائم زلزله ایستگاه چشمه سبز از شهر بم

Fig. 3. Vertical component of acceleration time history for Bam earthquake recorded at Cheshme Sabz station

جدول ۱. همگرایی روش عددی روی تغییر شکل دینامیکی جانبی بر حسب میلی‌متر

Table 1. Convergence of the numerical method for lateral dynamic deflection (millimeters)

تعداد نقاط	$h^P = 0$ بدون لایه پیزوالکتریک	$h^P \neq 0$ با لایه پیزوالکتریک	زمان اجرا
۵	۴/۴۵۱۹	۳/۸۹۹۱	۲ ثانیه
۷	۳/۹۲۱۵	۲/۴۷۱۸	۳/۵ ثانیه
۹	۳/۳۶۱۸	۲/۴۶۲۳	۵/۱ ثانیه
۱۳	۳/۳۵۱۱	۲/۴۶۲۱	۶/۶ ثانیه
۱۵	۳/۳۵۱۰	۲/۴۶۲۰	۸/۳ ثانیه
۱۷	۳/۳۵۱۰	۲/۴۶۲۰	۱۰ ثانیه

۴-۲- همگرایی روش عددی

به منظور بررسی همگرایی روش عددی تفاضلات مربعی برای پاسخ دینامیکی قاب بتنی با لایه های پیزوالکتریک در نقش محرک و سنسور، جدول (۱) آورده شده است. ماکزیمم تغییر شکل دینامیکی جانبی برای حالت‌های بدون و با لایه‌های هوشمند در این جدول نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش نقاط شبکه، تغییر شکل دینامیکی سازه کمتر شده تا جایی که بعد از $N=15$ نتایج در مرتبه چهارم اعشار تغییری نمی‌کند. به عبارت دیگر، برای حالت $h^P = 0$ ، تغییر شکل دینامیکی برای ۱۵ نقطه شبکه برابر ۳/۳۵۱۰ است در حالی که اگر نقاط شبکه به ۱۷ افزایش پیدا کند، تغییر شکل دینامیکی ثابت مانده و همان مقدار ۳/۳۵۱۰ می‌باشد. این روند برای حالت $h^P \neq 0$ نیز صادق است. بنابراین، در هر دو حالت برای تعداد نقاط شبکه ۱۵، تغییر شکل دینامیکی همگرا می‌شود.

در رابطه بالا، $\Gamma(t)$ یک متغیر وابسته به زمان است و $\Theta(x)$ متغیر مکانی وابسته به شرایط مرزی است که برای تیر دو سر گیردار بصورت زیر می‌باشد [۵۲-۵۰]:

$$\Theta(x) = \frac{\text{Sinh}(q) - \text{Sin}(q)}{\text{Cos}(q) - \text{Cosh}(q)} (\text{Cosh}(qx/L) - \text{Cos}(qx/L)) + \frac{\text{Sinh}(qx/L) - \text{Sin}(qx/L)}{\text{Cos}(q) - \text{Cosh}(q)} \quad q = 4.730041 \quad (60)$$

با جایگذاری رابطه (۵۹) در روابط (۳۱) تا (۳۸) و نوشتن آنها به فرم ماتریسی خواهیم داشت:

$$([K]\{d\} + [C]\{\dot{d}\} + [M]\{\ddot{d}\}) = \{-Ma(t)\}, \quad (61)$$

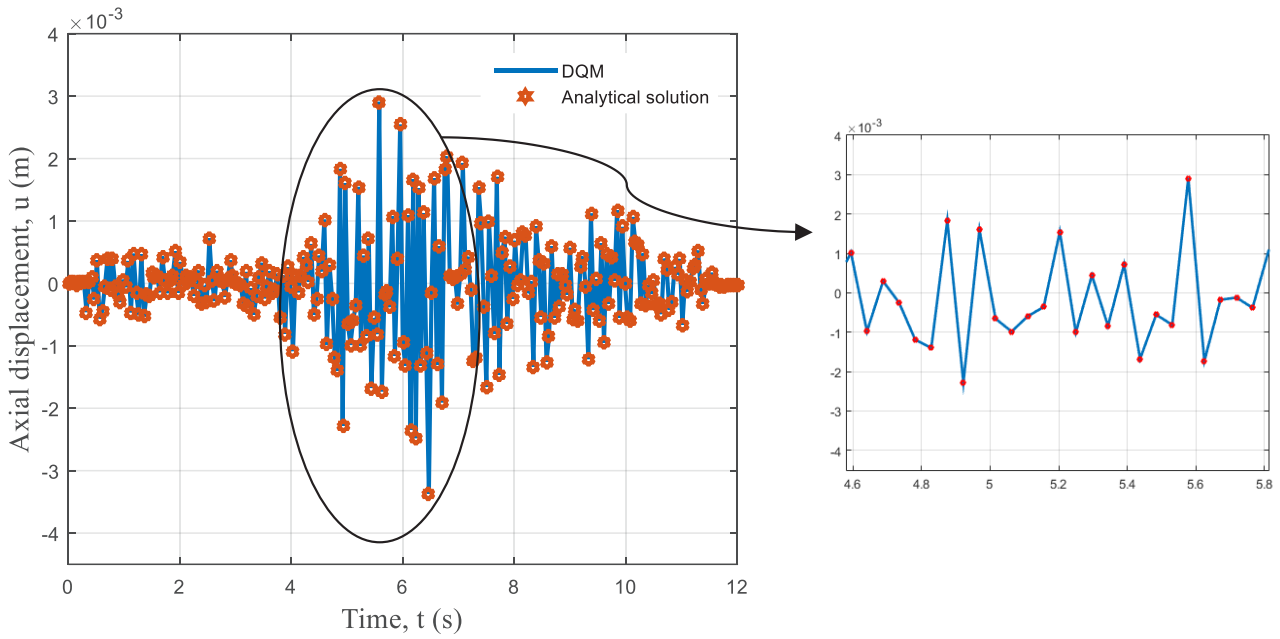
در نهایت به کمک روش نیومارک و حل معادله زمانی (۶۱)، پاسخ دینامیکی به روش تحلیلی محاسبه می‌شود و با نتایج حاصل از روش عددی ارائه شده (تفاضلات مربعی) مقایسه می‌گردد.

مقایسه نتایج تحلیلی (روش گالرکین) و عددی (روش تفاضلات مربعی) در شکل های (۴) و (۵) به ترتیب برای تغییر شکل جانبی و خیز قائم نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نتایج عددی و تحلیلی تطابق خوبی دارند که این نشان از اعتبار نتایج حاصل شده از روش تفاضلات مربعی

۴-۳- صحت‌سنجی

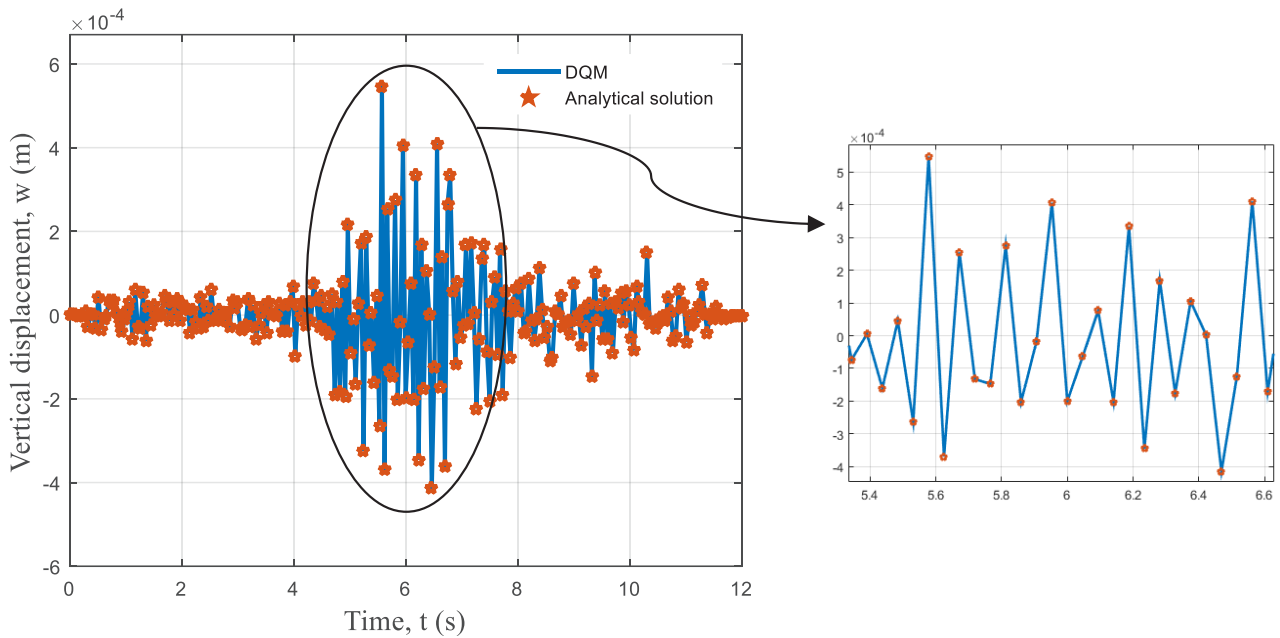
روش گالرکین یک روش تحلیلی است که برای حل معادلات دیفرانسیل استفاده می‌شود. یکی از مزایای کلیدی روش گالرکین، انعطاف‌پذیری آن جهت در نظر گرفتن انواع شرایط مرزی و هندسه های پیچیده می‌باشد. در این روش، بردار جابجایی بصورت زیر فرض می‌شود:

$$d(x,t) = \Theta(x)\Gamma(t), \quad (59)$$



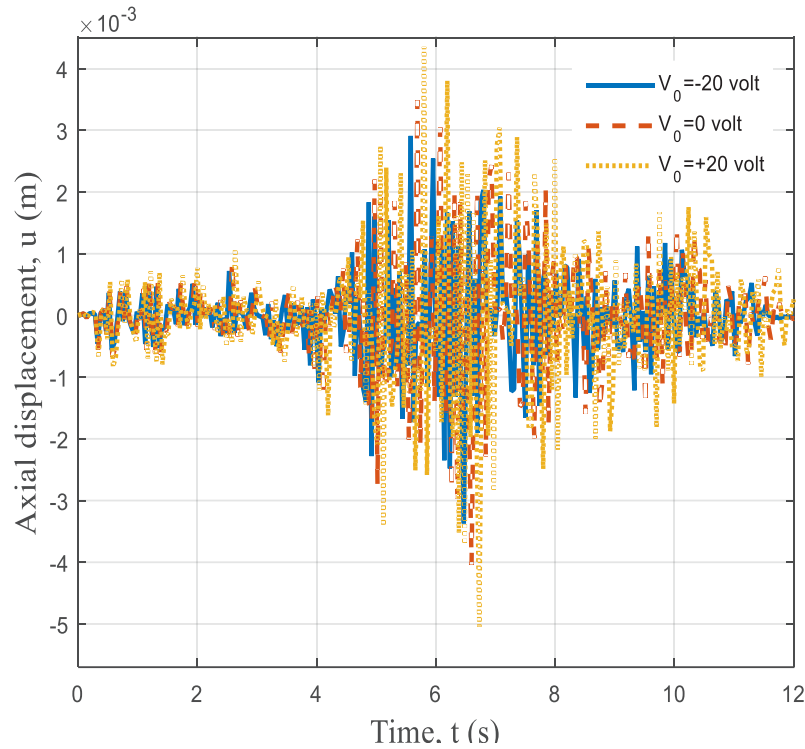
شکل ۴. مقایسه نتایج عددی و تحلیلی برای تغییر شکل جانبی قاب

Fig. 4. Comparison of numerical and analytical results for the lateral deflection of the frame



شکل ۵. مقایسه نتایج عددی و تحلیلی برای خیز قائم

Fig. 5. Comparison of numerical and analytical results for the vertical deflection



شکل ۶. اثر ولتاژ خارجی روی تغییرشکل دینامیکی جانبی قاب بتنی تحت زلزله

Fig. 6. Effect of external voltage on lateral dynamic deflection of concrete frame under earthquake

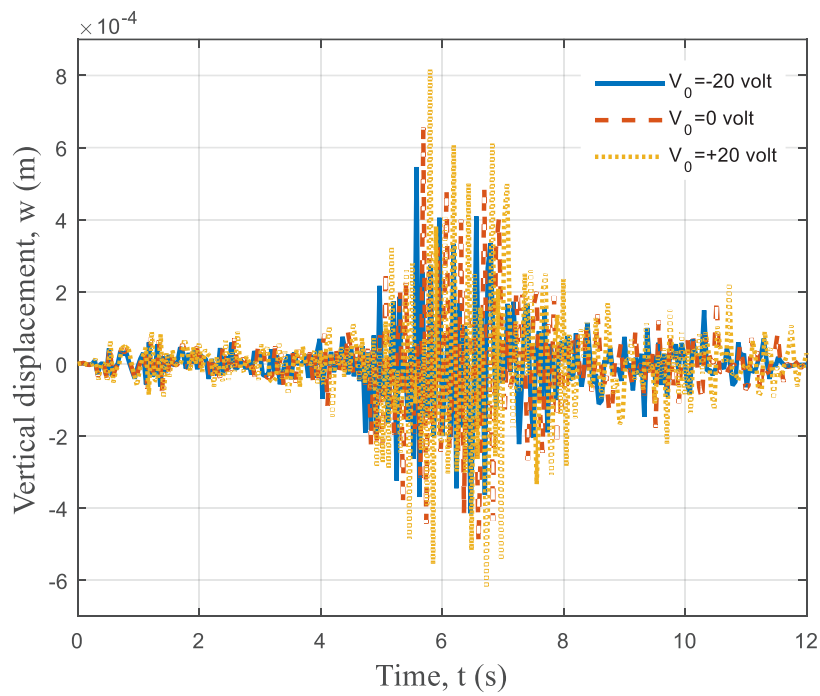
دارد. بیشینه تغییرشکل دینامیکی جانبی و قائم بدست آمده از روش تحلیلی به ترتیب ۲/۹۹۱ و ۰/۵۵۴۱ میلی‌متر است درحالی‌که بیشینه تغییرشکل دینامیکی جانبی و خیز قائم بدست آمده از روش عددی به ترتیب ۲/۹۸۲ و ۰/۵۵۳۵ میلی‌متر است. به عبارت دیگر خطای روش عددی نسبت به تحلیل برای خیز دینامیکی جانبی و قائم به ترتیب ۰/۳ و ۰/۱ درصد است. خطای روش عددی تفاضلات مربعی نسبت به روش تحلیلی بسیار ناچیز بوده و قابل قبول می‌باشد که این نشان از صحت نتایج این پروژه دارد.

۴-۴ اثر ولتاژ لایه پیزوالکتریک

تأثیر ولتاژ خارجی اعمال شده به لایه پیزوالکتریک روی تغییرشکل دینامیکی افقی و خیز قائم بر حسب زمان زلزله به ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ولتاژ خارجی اثر قابل توجهی روی جابجایی دینامیکی سیستم دارد بطوریکه با اعمال ولتاژ خارجی منفی به لایه پیزوالکتریک، تغییرشکل دینامیکی کمتر خواهد شد و بالعکس. به منظور مطالعه کمی، بیشینه تغییرشکل دینامیکی جانبی برای ولتاژ منفی و مثبت به ترتیب ۲/۹۸ و ۴/۳۳ میلی‌متر و بیشینه خیز دینامیکی قائم برای ولتاژ منفی و مثبت به ترتیب ۰/۵۸ و ۰/۸۱ میلی‌متر است. به عبارت دیگر،

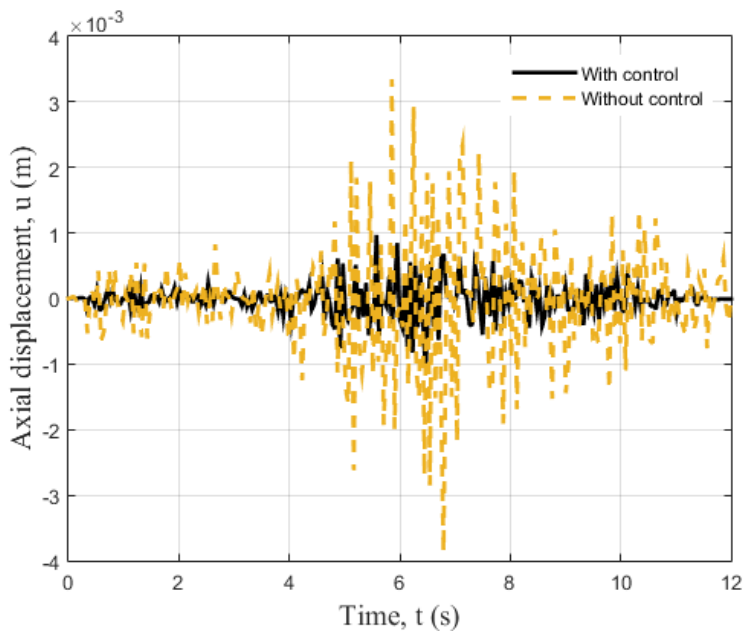
۴-۵ اثر کنترل‌کننده بر تغییرشکل جانبی و خیز قائم قاب

تغییرشکل دینامیکی افقی و خیز قائم بر حسب زمان زلزله به ترتیب در شکل‌های (۸) و (۹) برای حالت‌های با و بدون کنترل-کننده نشان داده شده است. شایان ذکر است که چون در تحلیل دینامیکی سازه خطای حالت ماندگار وجود ندارد، وجود بهره‌های (ثوابت) انتگرالی نه تنها باعث بهبود پاسخ دینامیکی سیستم نمی‌شود بلکه پاسخ را کندتر خواهد کرد. لذا در این مقاله از کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی استفاده شده است. بدین منظور مقادیر بهینه پارامترهای کنترل‌کننده شامل ضریب تناسب (G_d) و ضریب مشتق (G_v) به ترتیب برابر با ۳/۸۲۴ و ۵/۸۱۲ به دست آمدند.



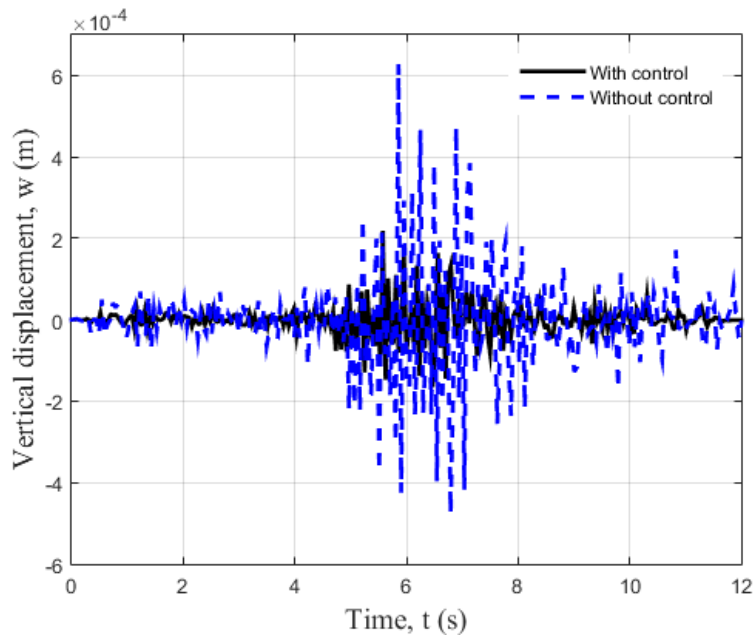
شکل ۷. اثر ولتاژ خارجی روی تغییر شکل دینامیکی قائم قاب بتنی تحت زلزله

Fig. 7. Effect of external voltage on vertical dynamic deflection of concrete frame under earthquake



شکل ۸. اثر کنترلر روی تغییر شکل دینامیکی جانبی قاب بتنی تحت زلزله

Fig. 8. Effect of controller on the lateral dynamic deflection of concrete frame under earthquake



شکل ۹. اثر کنترلر روی خیز دینامیکی قائم قاب بتنی تحت زلزله

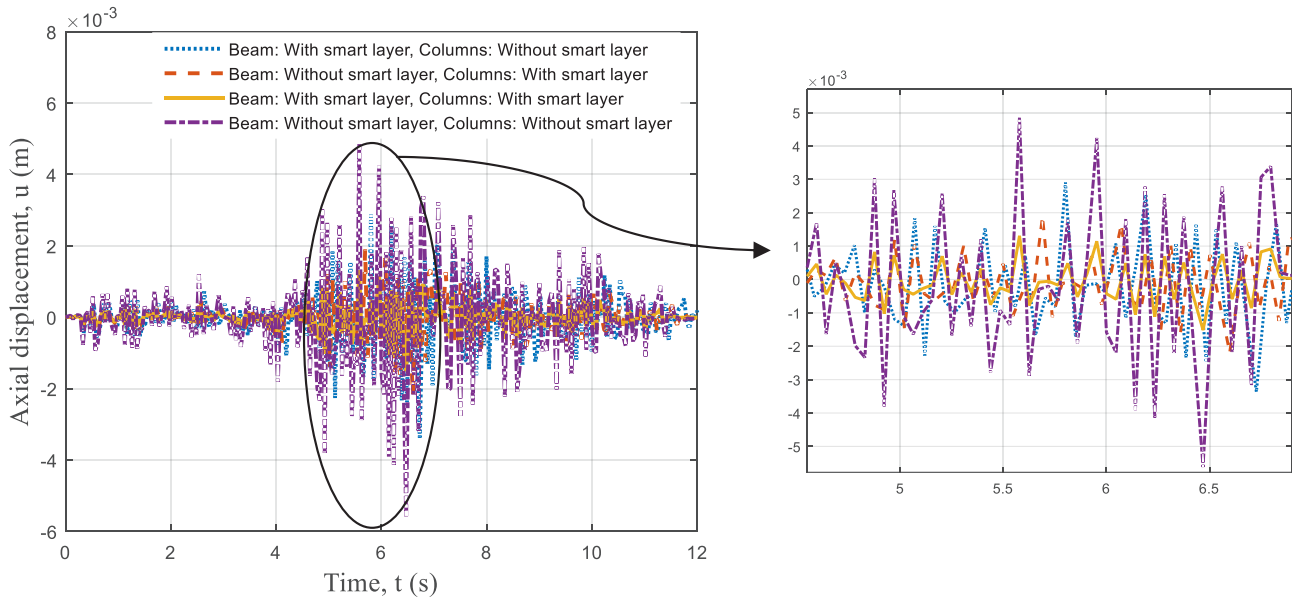
Fig. 9. Effect of controller on the vertical dynamic deflection of concrete frame under earthquake

- حالت دوم: تیر بدون لایه پیزوالکتریک بوده و ستون‌های دارای لایه پیزوالکتریک است.
 - حالت سوم: تیر و ستون‌ها دارای لایه پیزوالکتریک است.
 - حالت چهارم: تیر و ستون‌ها بدون لایه پیزوالکتریک است.
- همانطور که مشاهده می‌شود، تغییر شکل دینامیکی جانبی سازه در حالت دوم (حالتی که فقط ستون‌ها لایه پیزوالکتریک دارند) کمتر از حالت اول (حالتی که فقط تیر لایه پیزوالکتریک دارد) است در حالی که خیز دینامیکی قائم سازه در حالت اول کمتر از حالت دوم است. به عبارت دیگر وجود لایه پیزوالکتریک روی تیر اثر بیشتری روی خیز قائم دارد در حالی که وجود لایه پیزوالکتریک روی ستون‌ها، اثر بیشتری روی تغییر شکل جانبی سازه دارد. همچنین در حالت سوم، خیز دینامیکی جانبی و قائم از سایر حالت‌ها کمتر می‌باشد. از لحاظ فیزیکی این نتیجه منطقی به نظر می‌رسد چراکه ستون‌ها نقش بیشتری روی تغییر شکل جانبی سازه دارند و تیر نقش مهمی در تغییر شکل قائم قاب بتنی دارد. به علاوه، اگر لایه پیزوالکتریک روی تیر و ستون نباشد (حالت چهارم)، تغییر شکل دینامیکی جانبی و خیز قائم از تمامی حالت‌ها بیشتر می‌شود.

در این شکل‌ها، بدون استفاده از کنترل کننده، زمان میرایی سازه بسیار طولانی خواهد بود. همچنین اگر از یک کنترل کننده استفاده شود، دامنه نوسان پاسخ دینامیکی به شدت کاهش یافته و زمان میرایی سیستم کوتاه‌تر خواهد شد. دلیل این امر ایجاد یک میرایی فعال در سازه به واسطه وجود کنترل کننده می‌باشد. به منظور مطالعه کمی، ماکزیمم تغییر شکل دینامیکی جانبی و قائم برای حالت با کنترل کننده به ترتیب $0/0009698$ و $0/002187$ متر و برای حالت بدون کنترل کننده به ترتیب $0/003346$ متر و $0/006281$ متر است. به عبارت دیگر استفاده از کنترل کننده منجر به کاهش ۷۲ و ۶۵/۱۸ درصدی تغییر شکل دینامیکی جانبی و خیز قائم می‌شود.

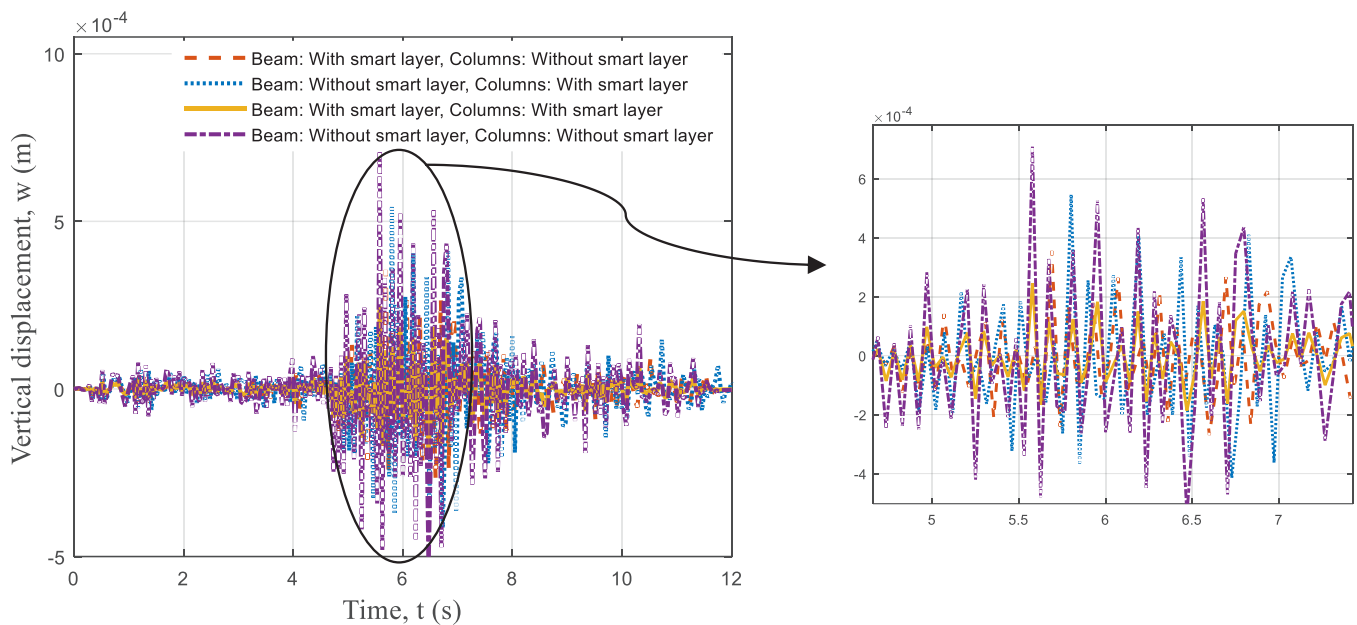
۴-۶- اثر محل قرارگیری لایه پیزوالکتریک بر تغییر شکل دینامیکی جانبی و خیز قائم قاب

- تأثیر محل قرارگیری لایه پیزوالکتریک واقع بر تیر و یا ستون‌های قاب بتنی روی تغییر شکل دینامیکی جانبی و قائم بر حسب زمان زلزله به ترتیب در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. چهار حالت در نظر گرفته شده:
- حالت اول: تیر دارای لایه پیزوالکتریک بوده و ستون‌های بدون لایه پیزوالکتریک است.



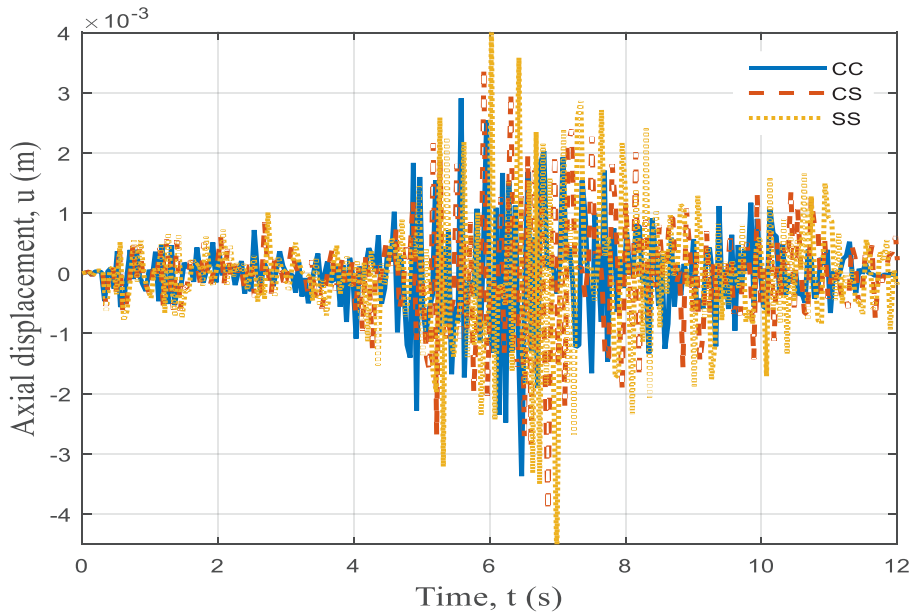
شکل ۱۰. اثر وجود لایه پیزوالکتریک روی تغییرشکل دینامیکی جانبی قاب بتنی تحت زلزله

Fig. 10. Effect of piezoelectric layer on lateral dynamic deflection of concrete frame under earthquake



شکل ۱۱. اثر وجود لایه پیزوالکتریک روی خیز دینامیکی قائم قاب بتنی تحت زلزله

Fig. 11. Effect of piezoelectric layer on vertical dynamic deflection of concrete frame under earthquake



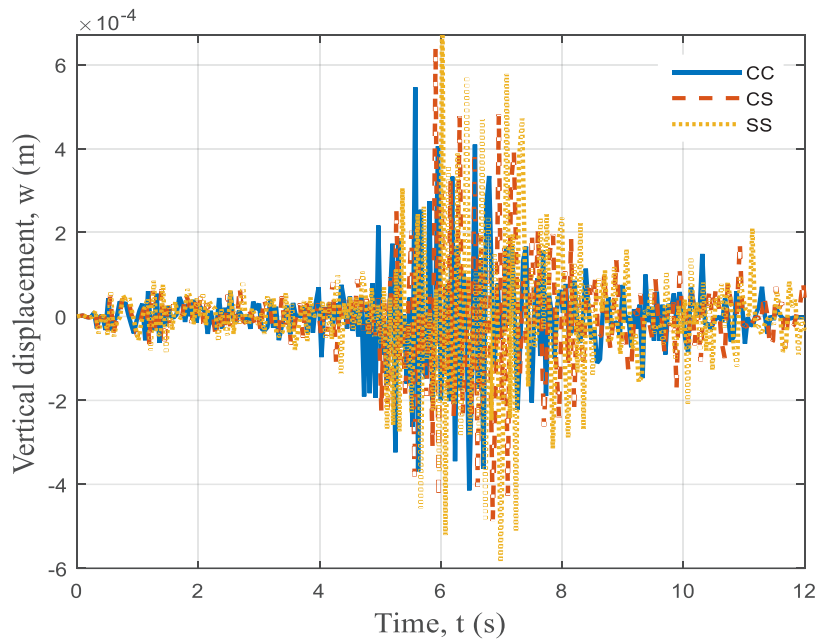
شکل ۱۲. اثر شرایط مرزی روی تغییرشکل دینامیکی جانبی قاب بتنی دارای لایه پیزوالکتریک تحت زلزله

Fig. 12. Effect of boundary conditions on lateral dynamic deflection of concrete frame with piezoelectric layer under earthquake

(۲). جدول مورد نظر برای طول تیر برابر ۴ متر و همچنین طول ستون‌ها برابر ۴ متر داده شده است. همچنین در اینجا، حالت ۱ مربوط به استفاده همزمان از لایه پیزو روی تیر و ستون، حالت ۲ مربوط به وجود لایه پیزو روی ستون و عدم وجود لایه پیزو روی تیر و حالت ۳ مربوط به وجود لایه پیزو روی تیر و عدم وجود لایه پیزو روی ستون می‌باشد. همانطور که در جدول (۲) مشخص است با تغییرات ولتاژ از مثبت به منفی، در تمامی سه حالت قرارگیری لایه پیزو و برای تمامی شرایط مرزی انتهای قاب، تغییرشکل دینامیکی کاهش می‌یابد. همچنین تغییر شکل دینامیکی جانبی به ترتیب در حالت وجود لایه پیزو روی تیر و ستون کمترین و در حالت وجود لایه پیزو تنها روی تیر بیشترین می‌باشد. همچنین اثر تغییرات شرایط مرزی از دو سرگيردار به دو سرمفصل بر تغییرشکل دینامیکی جانبی در حالت ۲ یعنی وجود لایه پیزو روی ستون و عدم وجود لایه پیزو روی تیر بیشتر از دو حالت دیگر می‌باشد. به طوریکه تغییرشکل دینامیکی جانبی در حالت ۲ برای تمامی ولتاژهای در نظر گرفته شده در حالت شرایط تکیه‌گاهی دو سر مفصل نسبت به دو سرگيردار به طور میانگین حدود ۱۹/۴ درصد بیشتر بوده درحالیکه این مقدار برای حالت ۱ یعنی استفاده همزمان از لایه پیزو روی تیر و ستون برابر ۱۴/۹ درصد و برای حالت ۳ یعنی وجود لایه پیزو روی تیر و عدم وجود لایه پیزو روی ستون برابر ۱۱/۹ درصد بیشتر می‌باشند.

۴-۷ اثر شرایط مرزی بر تغییرشکل دینامیکی جانبی و قائم قاب دارای لایه پیزوالکتریک
شکل‌های (۱۲) و (۱۳) اثر شرایط مرزی به ترتیب روی تغییرشکل دینامیکی افقی و قائم بر حسب زمان را نشان می‌دهند. با توجه به شکل مشخص است که با در نظر گرفتن شرایط مرزی گیردار-گیردار (CC)، تغییرشکل دینامیکی سیستم کاهش می‌یابد چراکه سفتی و بالتبع سختی سازه بیشتر می‌شود. همچنین تغییرشکل دینامیکی قاب با شرط مرزی گیردار-ساده (CS) از شرط مرزی ساده-ساده (SS) کمتر است چراکه سفتی سازه با شرط مرزی گیردار-ساده بیشتر از قاب با شرط مرزی ساده-ساده است. به بیان دیگر، شرایط مرزی گیردار در دو طرف قاب بتنی دارای لایه پیزوالکتریک، تغییرشکل دینامیکی جانبی و قائم را به ترتیب ۲۵/۵ و ۱۴/۱۲ درصد نسبت به شرایط مرزی دو سرمفصل کاهش می‌دهد.

۴-۸ بررسی اثر همزمان ولتاژ اعمالی به لایه پیزوالکتریک، محل قرار گیری لایه پیزوالکتریک و شرایط مرزی بر تغییرشکل دینامیکی جانبی قاب بتنی
در این قسمت به بررسی اثر همزمان محل قرار گیری لایه پیزوالکتریک روی تیر، ستون‌ها و یا هر دو، شرایط مرزی انتهای دو سر قاب و تغییرات ولتاژ اعمالی بر تغییرشکل دینامیکی جانبی قاب پرداخته شده است (جدول



شکل ۱۳. اثر شرایط مرزی روی خیز دینامیکی قائم قاب بتنی دارای لایه پیزوالکتریک تحت زلزله

Fig. 13. Effect of boundary conditions on vertical dynamic deflection of concrete frame with piezoelectric layer under earthquake

۴-۹ بررسی اثر همزمان مقدار ولتاژ و ضخامت لایه پیزوالکتریک بر تغییرشکل دینامیکی جانبی و خیز قائم قاب تحت اثر زلزله

اثر همزمان مقدار ولتاژ اعمالی و ضخامت لایه پیزوالکتریک بر تغییرشکل دینامیکی جانبی و خیز قائم قاب به ترتیب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است. همانطور که از دو شکل مشخص است مقدار تغییرشکل دینامیکی قاب تحت اثر زلزله در حالت وجود لایه پیزوالکتریک با هر نوع ضخامتی در حالت اعمال ولتاژ منفی کمتر از اعمال ولتاژ مثبت می‌باشد. همچنین مقدار تغییرشکل دینامیکی جانبی بیش از تغییرشکل دینامیکی قائم تیر قاب می‌باشد. نکته بسیار مهم دیگری که در اینجا مشخص می‌شود این است که برای حالت اعمال ولتاژ مثبت، تاثیر ضخامت لایه پیزو حاکم نبوده و با افزایش ضخامت لایه پیزو، تغییرشکل دینامیکی کاهش می‌یابد، اما در ولتاژهای منفی، تاثیر مقدار ضخامت لایه پیزو بیشتر نمایان شده به طوری که در ضخامت‌های کم لایه پیزو تا یک حد خاص، وجود لایه پیزو اثر معکوس داشته و سبب افزایش تغییرشکل دینامیکی شده اما بعد از یک مقدار خاص

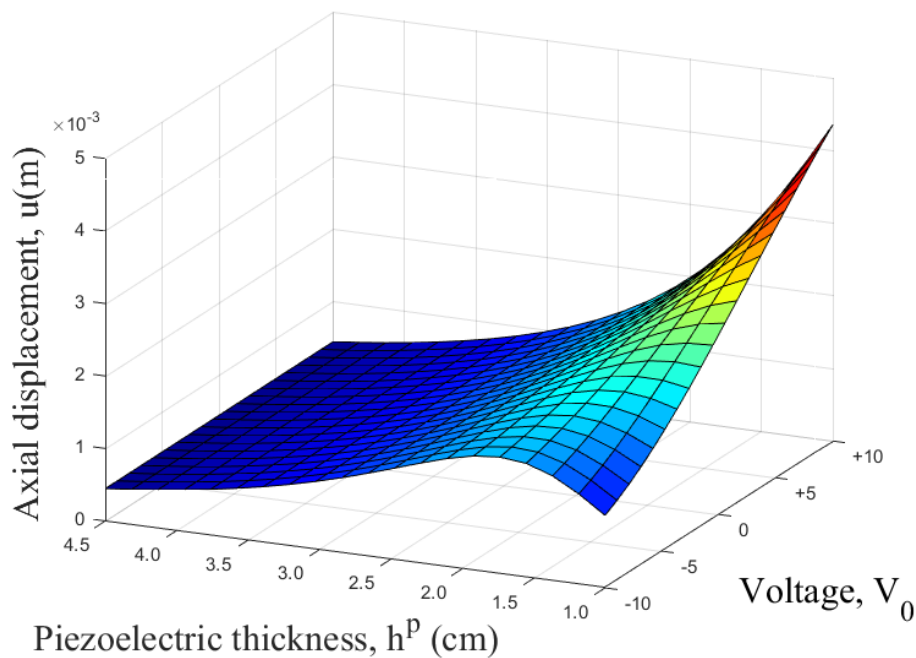
۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به تحلیل و کنترل دینامیکی قاب بتنی یک دهانه پوشش داده شده با لایه پیزوالکتریک روی تیر و ستون‌ها تحت بار لرزه‌ای پرداخته شد. به منظور کنترل قاب بتنی، از یک کنترل کننده تناسبی-مشتقی استفاده شد بدین صورت که یک لایه پیزوالکتریک در نقش محرک و دیگری در نقش سنسور در نظر گرفته شد. برای استخراج معادلات حاکم بر قاب بتنی دارای لایه پیزوالکتریک، ابتدا قاب به کمک تئوری هاپربولیک برشی مرتبه بالا و روش انرژی به صورت ریاضی مدل‌سازی شد و در نهایت جهت کوبل کردن معادلات بدست آمده برای تیر و ستون، از شرایط مرزی پیوستگی در نقاط اتصال تیر به ستون‌ها به یکدیگر استفاده شد. به منظور حل عددی

جدول ۲. بررسی اثر همزمان مقدار ولتاژ، شرایط مرزی و محل قرار گیری لایه پیزوالکتریک بر تغییرشکل دینامیکی جانبی قاب بتنی تحت زلزله

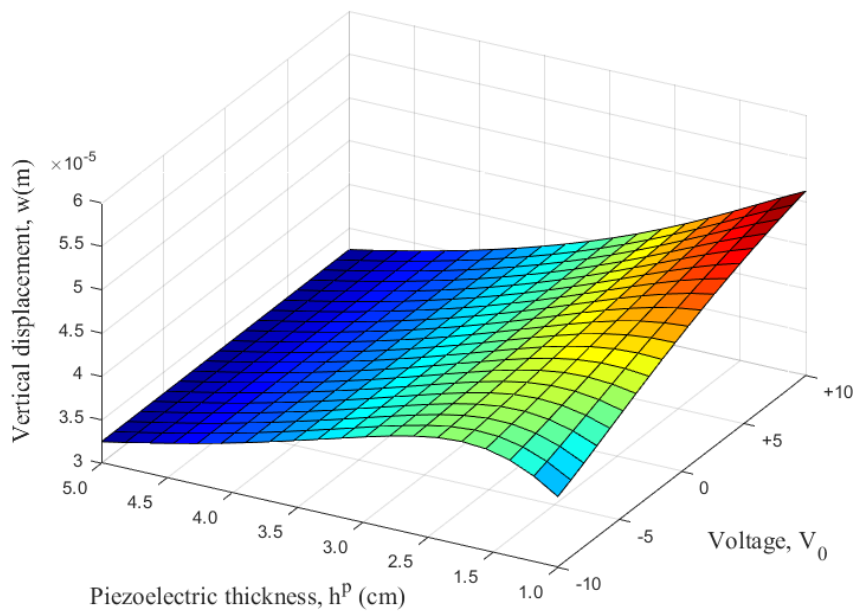
Table 2. The simultaneous effect of voltage value, boundary conditions and the location of the piezoelectric layer on the lateral dynamic deflection of the concrete frame under earthquake

Voltage	Case 1			Case 2			Case 3		
	CC	CS	SS	CC	CS	SS	CC	CS	SS
۱۵+	۳/۵۵۱	۳/۷۷۴	۴/۰۱۲	۴/۱۲۵	۴/۵۲۱	۴/۹۲۴	۴/۹۹۸	۵/۱۰۳	۵/۴۵۱
۷+	۳/۴۵۳	۳/۶۱۱	۳/۹۱۳	۴/۰۷۷	۴/۴۴۱	۴/۸۰۹	۴/۷۹۸	۴/۹۸۲	۵/۳۰۹
۰	۳/۳۱۷	۳/۵۱۰	۳/۸۰۹	۳/۹۰۱	۴/۳۰۹	۴/۷۱۲	۴/۶۱۰	۴/۸۹۰	۵/۲۵۵
۷-	۳/۲۲۱	۳/۴۸۷	۳/۷۲۲	۳/۸۸۱	۴/۲۳۳	۴/۶۶۷	۴/۵۶۱	۴/۷۷۱	۵/۱۵۶
۱۵-	۳/۱۱۲	۳/۳۲۹	۳/۶۶۵	۳/۷۱۲	۴/۱۲۵	۴/۵۱۲	۴/۴۴۱	۴/۶۷۱	۵/۰۱۲



شکل ۱۴. اثر همزمان مقدار ولتاژ و ضخامت لایه پیزوالکتریک بر تغییرشکل دینامیکی جانبی قاب بتنی تحت اثر زلزله

Fig. 14. The simultaneous effect of the voltage value and the thickness of the piezoelectric layer on the lateral dynamic deflection of the frame under earthquake



شکل ۱۵. اثر همزمان مقدار ولتاژ و ضخامت لایه پیزوالکتریک بر تغییر شکل دینامیکی قائم تیر قاب تحت اثر زلزله

Fig. 15. The simultaneous effect of the voltage value and the thickness of the piezoelectric layer on the vertical dynamic deflection of the frame under earthquake

فقط تیر لایه پیزوالکتریک دارد درحالی که این موضوع برای خیز دینامیکی قائم سازه بالعکس می‌باشد. به عبارت دیگر وجود لایه پیزوالکتریک روی تیر اثر بیشتری روی خیز دینامیکی قائم دارد در حالی که وجود لایه پیزوالکتریک روی ستون‌ها، اثر بیشتری روی تغییر شکل دینامیکی جانبی سازه دارد. از دیگر نتایج این تحقیق می‌توان به اثر قابل توجه ولتاژ خارجی بر روی جابجایی دینامیکی سیستم اشاره کرد بطوریکه با اعمال ولتاژ خارجی منفی به لایه پیزوالکتریک، جابجایی دینامیکی کمتر خواهد شد و بالعکس. به منظور مطالعه کمی، بیشینه خیز دینامیکی جانبی برای ولتاژ منفی و مثبت به ترتیب $۲/۹۸$ و $۴/۳۳$ میلی‌متر و بیشینه خیز دینامیکی قائم برای ولتاژ منفی و مثبت به ترتیب $۰/۵۸$ و $۰/۸۱$ میلی‌متر است. به عبارت دیگر، اعمال ولتاژ منفی به لایه پیزوالکتریک تغییر شکل دینامیکی جانبی و قائم را به ترتیب $۳۱/۱۷$ و $۲۸/۳۹$ درصد کاهش می‌دهد. به علاوه، شرایط مرزی گیردار در دو طرف قاب بتنی دارای لایه پیزوالکتریک، خیز دینامیکی جانبی و قائم را به ترتیب $۲۵/۵$ و $۱۴/۱۲$ درصد نسبت به شرایط مرزی دو سر مفصل کاهش می‌دهد. همچنین اثر تغییرات شرایط مرزی از دو سر گیردار به دو سر مفصل بر تغییر شکل دینامیکی جانبی در حالت وجود لایه پیزو روی ستون و عدم وجود لایه پیزو روی تیر بیشتر از دو حالت دیگر یعنی استفاده همزمان از لایه پیزو روی تیر و ستون و یا وجود لایه پیزو روی تیر و عدم

معادلات کوپل شده دینامیکی، برای اولین بار روش عددی تفاضلات مربعی به همراه روش نیومارک بکار گرفته شدند. مزیت این روش، دقت بالای نتایج به همراه سرعت بالا در محاسبه آن می‌باشد. بعد از صحت‌سنجی نتایج، اثر پارامترهای مختلفی همچون ولتاژ اعمالی به لایه پیزوالکتریک، کنترل‌کننده از نوع پیزوالکتریک، ضخامت لایه پیزوالکتریک و اثرات ترکیبی آنها بر تغییر شکل دینامیکی بررسی شد. در اینجا، مقادیر بهینه پارامترهای کنترل‌کننده شامل ضریب تناسب و ضریب مشتق به ترتیب برابر با $۳/۸۲۴$ و $۵/۸۱۲$ به دست آمدند. نتایج نشان می‌دهد برای تعداد نقاط شبکه ۱۵، تغییر شکل دینامیکی بدست آمده از روش تفاضلات مربعی همگرا می‌شود. همچنین، اگر از یک کنترل‌کننده از نوع پیزوالکتریک استفاده شود، دامنه تغییر شکل به شدت کاهش یافته و زمان میرایی سیستم کوتاه‌تر خواهد شد. به منظور مطالعه کمی، ماکزیمم تغییر شکل دینامیکی جانبی و ماکزیمم خیز قائم قاب با مشخصات مفروض برای حالت با کنترل‌کننده به ترتیب $۰/۰۰۰۹۶۹۸$ و $۰/۰۰۰۲۱۸۷$ متر و برای حالت بدون کنترل‌کننده به ترتیب $۰/۰۰۳۳۴۶$ متر و $۰/۰۰۰۶۲۸۱$ است. به عبارت دیگر استفاده از کنترل‌کننده به ترتیب منجر به کاهش ۷۲ و $۶۵/۱۸$ درصدی تغییر شکل دینامیکی جانبی و قائم می‌شود. همچنین مشاهده شد، که تغییر شکل دینامیکی جانبی سازه درحالتی که فقط ستون‌ها لایه پیزوالکتریک دارند کمتر از حالتی است که

- [6] M. Sharifi, R. Kolahchi, M. Rabani Bidgoli, Dynamic analysis of concrete beams reinforced with Tio2 nano particles under earthquake load, *Wind and Structures*, 26(1) (2018) 1-9.
- [7] M. Azmi, R. Kolahchi, M. Rabani Bidgoli, Dynamic analysis of concrete column reinforced with SiO2 nanoparticles subjected to blast load, *Advances in Concrete Construction*, 7(1) (2019) 51-63.
- [8] T. Liu, W. Zhong, Earthquake responses of near-fault frame structure clusters due to thrust fault by using flexural wave method and viscoelastic model of earth medium, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 61-62 (2014) 57-62.
- [9] F. Mazza, Wind and earthquake dynamic responses of fire-exposed steel framed structures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 78 (2015) 218-229.
- [10] P. Paultre, B. Weber, S. Mousseau, J. Proulx, Detection and prediction of seismic damage to a high-strength concrete moment resisting frame structure, *Engineering Structures*, 114 (2016) 209-225.
- [11] N. Øystad-Larsen, E. Erduran, A.M. Kaynia, Evaluation of effect of confinement on the collapse probability of reinforced concrete frames subjected to earthquakes, *Procedia Engineering*, 199 (2017) 784-789.
- [12] Z.I. Syed, O.A. Mohamed, K. Murad, M. Kewalramani, Performance of Earthquake-resistant RCC Frame Structures under Blast Explosions, *Procedia Engineering*, 180 (2017) 82-90.
- [13] S. Mahmoud, M. Genidy, H. Tahooun, Time-History Analysis of Reinforced Concrete Frame Buildings with Soft Storeys *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42 (2017) 1201-1217.
- [14] T.K. Šipoš, H. Rodrigues, M. Grubišić, Simple design of masonry infilled reinforced concrete frames for earthquake resistance, *Engineering Structures*, 171 (2018) 961-981.
- [15] C. Wang, J. Xiao, C. Wang, C. Zhang, Nonlinear damping and nonlinear responses of recycled aggregate concrete frames under earthquake loading, *Engineering Structures*, 201 (2019) 109575.
- وجود لایه پیانو روی ستون می‌باشد. به طوریکه تغییرشکل دینامیکی جانبی در این حالت برای تمامی ولتاژهای در نظر گرفته شده در حالت شرایط تکیه‌گاهی دو سر مفصل نسبت به دو سر گیردار و طول تیر و ستون برابر ۴ متر به طور میانگین حدود ۱۹/۴ درصد بیشتر بوده درحالیکه این مقدار برای حالت استفاده همزمان از لایه پیانو روی تیر و ستون برابر ۱۴/۹ درصد و برای حالت وجود لایه پیانو روی تیر و عدم وجود لایه پیانو روی ستون برابر ۱۱/۹ درصد بیشتر می‌باشند. از نتایج مهم دیگر این تحقیق این است که برای حالت اعمال ولتاژ مثبت، تاثیر ضخامت لایه پیانو حاکم نبوده و با افزایش ضخامت لایه پیانو، تغییرشکل دینامیکی کاهش می‌یابد اما در ولتاژهای منفی، تاثیر مقدار ضخامت لایه پیانو بیشتر نمایان شده به‌طوریکه در ضخامت‌های کم لایه پیانو تا یک حد خاص، وجود لایه پیانو اثر معکوس داشته و سبب افزایش تغییرشکل دینامیکی شده اما بعد از یک مقدار خاص ضخامت لایه پیانو (در اینجا حدود ۲ سانتی‌متر برای تغییرشکل دینامیکی جانبی و ۲/۵ سانتی‌متر برای تغییرشکل دینامیکی قائم) با افزایش ضخامت، تغییرشکل دینامیکی به شدت کاهش می‌یابد.

منابع

- [1] A. Jafarian Arani, R. Kolahchi, Buckling analysis of embedded concrete columns armed with carbon nanotubes, *Computers and Concrete*, 17 (2016) 567-578.
- [2] B. Safari Bilouei, R. Kolahchi, M. Rabani Bidgoli, Buckling of concrete columns retrofitted with Nano-Fiber Reinforced Polymer (NFRP), *Computers and Concrete*, 18(5) (2016) 1053-1063.
- [3] A. Arbabi, R. Kolahchi, M. Rabani Bidgoli, Concrete columns reinforced with Zinc Oxide nanoparticles subjected to electric field: buckling analysis, *Wind and Structures*, 24 (2017) 431-446.
- [4] M. Zamanian, R. Kolahchi, M. Rabani Bidgoli, Agglomeration effects on the buckling behaviour of embedded concrete columns reinforced with SiO2 nanoparticles, *Wind and Structures*, 24 (2017) 43-57.
- [5] H. Mohammadian, R. Kolahchi, M. Rabani Bidgoli, Dynamic response of concrete beams reinforced by Fe2O3 nanoparticles subjected to magnetic field and earthquake load, *Earthquakes and Structures*, 13(6) (2017) 589-598.

- layers, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 89 (2012) 98.
- [26] M. Arab, Control of shell vibrations with piezoelectric materials, MS Thesis, University of Yazd, Faculty of Civil Engineering, (2013). (in Persian)
- [27] L. Yang, Y. Luo, T. Qiu, M. Yang, G. Zhou, G. Xie, An analytical method for the buckling analysis of cylindrical shells with non-axisymmetric thickness variations under external pressure, *Thin-Walled Structures*, 85 (2014) 431.
- [28] M. Yaqoob Yasin, S. Kapuria, An efficient finite element with layerwise mechanics for smart piezoelectric composite and sandwich shallow shells, *Computational Mechanics*, 53 (2014) 101-124.
- [29] A.V. Loptain, E.V. Morozov, Buckling of the composite sandwich cylindrical shell with clamped ends under uniform external pressure, *Composite Structures*, 122 (2015) 209.
- [30] M. Ghasemi, A. jaamialahmadi, Analytical solution based on higher order shear and normal deformation theory for Buckling of functionally graded plates with piezoelectric layers, *Modares Mechanical Engineering*, 15(3) (2015) 387-397. (in Persian)
- [31] H. Farahani, R. Azarafza, F. Barati, Mechanical buckling of a functionally graded cylindrical shell with axial and circumferential stiffeners using third-order shear deformation theory, *Comptes Rendus Mécanique*, 342 (2014) 501.
- [32] Z.X. Lei, L.W. Zhang, K.M. Liew, J.L. Yu, Dynamic stability analysis of carbon nanotube-reinforced functionally graded cylindrical panels using the element-free kp-Ritz method, *Composite Structures*, 113 (2014) 328.
- [33] Z.M. Li, P. Qiao, Buckling and postbuckling of anisotropic laminated cylindrical shells under external pressure and axial compression in thermal environments, *Composite Structures*, 119 (2015) 709.
- [34] B.A. Selim, L.W. Zhang, K.M. Liew, Active vibration control of CNT-reinforced composite plates with piezoelectric layers based on Reddy's higher-order shear deformation theory. *Composite Structures*, 11 (2016) 11-
- [16] J. Su, B. Liu, G. Xing, Y. Ma, J. Huang, Seismic Damage and Collapse Assessment of Reinforced Concrete Frame Structures Using a Component-Classification Weighted Algorithm, *Mathematical Problems in Engineering*, (2019) 6438450, 19 pages.
- [17] J. Yu, J. Ye, B. Zhao, Shilang Xu, Dynamic Response of Concrete Frames Including Plain Ductile Cementitious Composites, *Journal of Structural Engineering*, 145(6) (2019) 04019042.
- [18] H. Sha, X. Chong, J. Wei, Seismic performance of precast concrete frame with energy dissipative cladding panel system: Half-scale test and numerical analysis, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 165 (2022) 107712.
- [19] H.S. Tzou, M. Cadre, Theoretical analysis of a multi-layered thin shell coupled with piezoelectric shell actuators for distributed vibration controls, *Journal of Sound and Vibration*, 132 (1989) 433-450.
- [20] G.G. Sheng, X. Wang, Thermoelastic vibration and buckling analysis of functionally graded piezoelectric cylindrical shells, *Applied Mathematical Modelling*, 34 (2010) 2630-2643.
- [21] A. Alibeigloo, A.M. Kani, 3D free vibration analysis of laminated cylindrical shell integrated piezoelectric layers using the differential quadrature method, *Applied Mathematical Modelling*, 34 (2010) 4123-4137.
- [22] S. Hashemi Hoseini, S. Fazeli, M. Fadaei, Piezoelectric materials and their application in the transportation industry, *Mechanical Engineering*, 20(77) (2011) 48-56. (in Persian)
- [23] L.L. Ke, Y.S. Wang, Z.D. Wang, Nonlinear vibration of the piezoelectric nanobeams based on nonlocal theory, *Composite Structures*, 94 (2012) 20-38.
- [24] M. Bodaghi, M. Shakeri, An analytical approach for free vibration and transient response of functionally graded piezoelectric cylindrical panels subjected to impulsive loads, *Composite Structures*, 94 (2012) 17-21.
- [25] A. Alibeigloo, A.M. Kani, M.H. Pashaei, Elasticity solution for the free vibration analysis of functionally graded cylindrical shell bonded to thin piezoelectric

- 192 (2023) 110188.
- [44] X. Zhang, H. Qi, Dynamic behavior of an inhomogeneous piezoelectric/piezomagnetic half space with a circular ring structure under SH wave, *Wave Motion*, 114 (2022) 103037.
- [45] H.T. Thai, T.P. Vo, A nonlocal sinusoidal shear deformation beam theory with application to bending, buckling, and vibration of nanobeams, *International Journal of Engineering Science*, 54 (2012) 58–66.
- [46] A. Zamani, R. Kolahchi, M. Rabani Bidgoli, Seismic response of smart nanocomposite cylindrical shell conveying fluid flow using HDQ-Newmark methods, *Computers and Concrete*, 20 (2017) 671-682.
- [47] Q. Zhao, Y. Liu, L. Wang, H. Yang, D. Cao, Design method for piezoelectric cantilever beam structure under low frequency condition, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11 (2018) 153-159.
- [48] R. Kolahchi, M. Safari, M. Esmailpour, Dynamic stability analysis of temperature-dependent functionally graded CNT-reinforced visco-plates resting on orthotropic elastomeric medium, *Composite Structures*, 150 (2016) 255–265.
- [49] M.H. Hajmohammad, A. Farrokhan, R. Kolahchi, Smart control and vibration of viscoelastic actuator-multiphase nanocomposite conical shells-sensor considering hydrothermal load based on layerwise, *Aerospace Science and Technology*, 78 (2018) 260-270.
- [50] H. Rafieipour, S.M. Tabatabaei, M. Abbaspour, A novel approximate analytical method for nonlinear vibration analysis of Euler–Bernoulli and Rayleigh beams on the nonlinear elastic foundation, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39 (2014) 3279–3287.
- [51] M. Şimşek, Large amplitude free vibration of nanobeams with various boundary conditions based on the nonlocal elasticity theory, *Composites: Part B*, 56 (2014) 621-628.
- [52] R. Ansari, H. Rouhi, A. Nasiri Rad, Vibrational analysis of carbon nanocones under different boundary conditions: An analytical approach, *Mechanics research communications*, 56 (2014) 130–135.
- 19.
- [35] J. Li, Zh. Ma, Zh. Wang, Y. Narita, Random Vibration Control of Laminated Composite Plates with Piezoelectric Fiber Reinforced Composites, *Acta Mechanica Solida Sinica*, 29 (2016) 316-327.
- [36] A. Alibeigloo, Thermoelastic analysis of functionally graded carbon nanotube reinforced composite cylindrical panel embedded in piezoelectric sensor and actuator layers, *Composite Part B: Engineering*, 98 (2016) 225–243.
- [37] M.R. Barati, M.H. Sadr, A.M. Zenkour, Buckling analysis of higher order graded smart piezoelectric plates with porosities resting on elastic foundation, *International Journal of Mechanical Sciences*, 117 (2016) 309-320.
- [38] M. Karimi, R. Tikani, S. Ziaei-Rad, Piezoelectric energy harvesting from bridge vibrations under moving consecutive masses, *Modares Mechanical Engineering*, 16(6), (2016) 108-118. (in Persian)
- [39] K. Kuliński, J. Przybylski, Piezoelectric effect on transversal vibrations and buckling of a beam with varying cross section, *Mechanics Research Communications*, 82 (2017) 43-48.
- [40] J. Przybylski, G. Gasiorski, Nonlinear vibrations of elastic beam with piezoelectric actuators, *Journal of Sound and Vibration*, 437 (2018) 150-165.
- [41] A. Bathaei, M. Ramezani, S.M. Zahrai, Semi-active fuzzy control of 5-story structure under near & far field earthquakes using piezoelectric friction dampers, *Journal of Structure & Steel*, 12(24) (2019) 65-76. (in Persian)
- [42] D.G. Ninh, T.V. Vang, D.V. Dao, Effect of cracks on dynamical responses of double-variable-edge plates made of graphene nanoplatelets-reinforced porous matrix and sur-bonded by piezoelectric layers subjected to thermo-mechanical loads, *European Journal of Mechanics - A/ Solids*, 96 (2022) 104742.
- [43] A-S Poudrel, V-H Nguyen, G. Rosi, Optimization of a smart beam for monitoring a connected inaccessible mechanical system: Application to bone-implant coupling, *Mechanical Systems and Signal Processing*,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Rabani bidgoli, M. Kargar, H. Mazaheri, Dynamic deflection control of reinforced concrete frame under earthquake load with piezoelectric layer, Amirkabir J. Civil Eng., 56(2) (2024) 229-252.

DOI: [10.22060/ceej.2024.22858.8058](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.22858.8058)

