

Research Article

Evaluation of the Seismic Performance of a Suspension Bridge Equipped with a Tuned Mass Damper under Far-Field Ground Motions Using the DEMATEL Approach: A Case Study of the Golden Gate Bridge

Mohammad Taghi Khani¹, Mir Hamid Hosseini^{2*}, Hossein Hosseini Lavasani³, Pasha Javadi²

1- Ph.D. Candidate in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Kharazmi University, Tehran, Iran



Citation: Khani, M.T., Hosseini, M.H., Hosseini Lavasani, H., and Javadi P. (2026), "Evaluation of the Seismic Performance of a Suspension Bridge Equipped with a Tuned Mass Damper under Far-Field Ground Motions Using the DEMATEL Approach: A Case Study of the Golden Gate Bridge", *Journal of Steel and Structures*, 20(53), pp.5-23. (In Persian)

doi <https://doi.org/10.22034/jss.2026.596327.1052>

Article info:

Article History:

Received: 28 January 2026

Revised: 16 April 2026

Accepted: 18 April 2026

Published: 23 September 2026

Keywords:

Tuned Mass Damper (TMD)
Artificial Neural Network
DEMATEL Method
Suspension Bridge
Golden Gate Bridge

ABSTRACT

Background: One of the novel methods for evaluating suspension bridges during and after earthquakes is the use of the DEMATEL method. This approach provides an effective framework for identifying the relationships and importance of influencing parameters in the seismic assessment of complex structural systems.

Methods: In this study, the seismic behavior of a suspension bridge equipped with a tuned mass damper (TMD) under far-field earthquake records (Case study: Golden Gate Bridge) was investigated using the DEMATEL method. A three-dimensional finite element model of the bridge was developed in ABAQUS software. Time-history analyses were performed using seven far-field earthquake records. First, modal analysis was conducted to extract the natural frequencies and mode shapes of the bridge. Subsequently, the time-dependent structural responses under earthquake excitations were evaluated.

Results: The results indicate that the main cables and towers have the greatest contribution to seismic energy absorption, while the flexibility of the suspension system reduces the transmission of seismic forces to the deck. Furthermore, it was demonstrated that applying nonlinear analysis in the modeling of suspension bridges can significantly improve the accuracy of seismic response predictions. The results also confirm the effectiveness of the tuned mass damper in reducing seismic displacements. The use of a TMD reduced the average permanent displacements developed in the bridge by approximately 35%.

Conclusion: Based on the proposed neural network approach, with an accuracy exceeding 90%, and using the DEMATEL method, it was determined that structural displacement and vibration modes are the most influential response parameters. In addition, foundation and cable stiffness, as well as the behavior of the tuned mass damper, were identified as the most effective influencing parameters. The long computational time and high complexity associated with modeling and analysis represent the main limitations of this research.

* Corresponding Author's E-mail: mirhamid.hosseini@srbiau.ac.ir



Copyright for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Iranian Society of Steel Structures Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Introduction

Long-span suspension bridges are considered among the most complex civil engineering structures due to their high flexibility, low stiffness-to-mass ratio, geometrical nonlinearity of cables, and the complex interaction between towers, deck, main cables, and hangers. These characteristics have made the seismic behavior assessment of such structures one of the important challenges in earthquake engineering and finite element analysis. The response of suspension bridges under dynamic loads induced by earthquakes and wind is highly nonlinear and strongly dependent on the interaction between the cable system, towers, and deck. Early investigations of the seismic behavior of the Golden Gate Bridge were mainly based on two-dimensional analytical models and conventional modal analysis approaches. In these studies, the dynamic response of the structure was evaluated using simplified beam-mass models under the assumption of linear structural behavior. Although these models were effective in estimating fundamental natural frequencies and primary vibration modes, they were unable to accurately simulate large deformations, nonlinear cable behavior, and multi-support excitation effects. Therefore, in the present study, the nonlinear behavior of the bridge is investigated using ABAQUS finite element software. A review of previous studies and the structural characteristics of the Golden Gate Bridge indicates that only a limited number of comprehensive numerical models have been developed for this bridge. The main reason is the high complexity and computational challenges associated with modeling and analyzing such a large-scale suspension system. Consequently, only a limited number of researchers have successfully developed detailed numerical models of the Golden Gate Bridge. One of the major challenges of the present study is therefore the accurate three-dimensional modeling and nonlinear analysis of this bridge. Furthermore, the application of a

tuned mass damper has demonstrated considerable potential for improving the seismic performance of suspension bridges by reducing earthquake-induced displacements and controlling dynamic responses. The effectiveness of the proposed vibration control system is evaluated through numerical simulations, and its influence on the seismic behavior of the Golden Gate Bridge is investigated.

Methods

In this study, the seismic behavior of a suspension bridge equipped with a tuned mass damper (TMD) under far-field earthquake records (Case study: Golden Gate Bridge) was investigated using the DEMATEL method. A three-dimensional finite element model of the bridge was developed in ABAQUS software. Time-history analyses were performed using seven far-field earthquake records. First, modal analysis was conducted to extract the natural frequencies and mode shapes of the bridge. Subsequently, the time-dependent structural responses under earthquake excitations were evaluated.

Results

The results indicate that the main cables and towers have the greatest contribution to seismic energy absorption, while the flexibility of the suspension system reduces the transmission of seismic forces to the deck. Furthermore, it was demonstrated that applying nonlinear analysis in the modeling of suspension bridges can significantly improve the accuracy of seismic response predictions. The results also confirm the effectiveness of the tuned mass damper in reducing seismic displacements. The use of a TMD reduced the average permanent displacements developed in the bridge by approximately 35%.

Conclusion

Based on the proposed neural network approach, with an accuracy exceeding 90%, and using the DEMATEL method, it was determined that structural displacement and vibration modes are the most influential response parameters. In addition, foundation and cable stiffness, as well as the behavior of the tuned mass damper, were identified as the most effective influencing parameters. The long computational time and high complexity associated with modeling and analysis represent the main limitations of this research.

Declaration of Generative AI and AI-assisted Technologies in the Writing Process

The authors declare that no generative AI or AI-assisted technologies were used in the writing, editing, or preparation of this manuscript. All parts of this paper, including conceptualization, data analysis, drafting of the text, and scientific revisions, were performed exclusively by the authors. The authors take full responsibility for the content and accuracy of the information presented herein.

Ethical Consideration

Compliance with ethical guidelines

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Author's contributions

The author confirms sole responsibility for the conceptualization, structural modeling, data analysis, and the preparation of the entire manuscript.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper. There is no conflict of interest associated with the publication of this manuscript.

Acknowledgments

The author received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article. No specific grants from any funding agency in the public, commercial, or not sectors were provided for this research.

ارزیابی رفتار لرزه‌ای پل معلق مجهز به میراگر جرمی تحت رکوردهای لرزه‌ای حوزه دور از گسل با استفاده از روش DEMATEL (مطالعه موردی: پل گلدن گیت)

محمدتقی خانی^۱، میرحمید حسینی^{۲*}، حسین حسینی لواسانی^۳، پاشا جواد^۴

۱- دانشجوی دکتری رشته مهندسی عمران، دانشکده عمران معماری و هنر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران معماری و هنر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران



Citation: Khani, M.T., Hosseini, M.H., Hosseini Lavasani, H., and Javadi P. (2026), "Evaluation of the Seismic Performance of a Suspension Bridge Equipped with a Tuned Mass Damper under Far-Field Ground Motions Using the DEMATEL Approach: A Case Study of the Golden Gate Bridge", *Journal of Steel and Structures*, 20(53), pp.5-23. (In Persian)

doi <https://doi.org/10.22034/jss.2026.596327.1052>

چکیده

زمینه پژوهش: مطالعه میزان اثرگذاری و اثرپذیری دقیق پارامترهای مختلف بر یکدیگر در سازه‌های مهم و حیاتی نظیر پل‌های معلق بسیار سخت و پیچیده است. لذا یکی از روش‌های نوین ارزیابی پل‌های معلق در حین زلزله و پس از آن، استفاده از روش DEMATEL بوده که یک معیار دقیق از تأثیرگذاری و تأثیرپذیری پارامترهای مختلف است. به همین دلیل در این پژوهش این مهم با استفاده از روش مذکور، تحت رکوردهای لرزه‌ای حوزه دور از گسل بر روی پل معلق گلدن گیت مدل‌سازی، ارزیابی و تحلیل شده است.

روش پژوهش: در این پژوهش، رفتار لرزه‌ای پل معلق مجهز به میراگر جرمی تحت رکوردهای لرزه‌ای حوزه دور از گسل (مطالعه موردی: پل گلدن گیت) با استفاده از روش DEMATEL مورد بررسی قرار گرفته است. پل به صورت سه بعدی در نرم افزار Abaqus مدل‌سازی شده است. تحلیل‌های تاریخیچه زمانی تحت هفت رکورد حوزه دور از گسل صورت گرفته است که تحلیل مودال برای استخراج فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها انجام شده و سپس پاسخ زمانی سازه تحت رکوردهای زلزله بررسی شده است.

یافته‌ها: همچنین در این پژوهش مشخص شد که استفاده از تحلیل غیرخطی در مدل‌سازی پل‌های معلق می‌تواند دقت پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. نتایج بیانگر کارایی مناسب میراگر جرمی در کاهش تغییر مکان‌های لرزه‌ای بوده است؛ به نحوی که استفاده از میراگر جرمی توانسته است به طور متوسط میانگین تغییر مکان‌های ماندگار ایجاد شده در پل را به میزان ۳۵ درصد کاهش دهد.

نتیجه‌گیری: با استفاده از روش شبکه عصبی پیشنهادی با دقت بالای ۹۰ درصد و استفاده از روش DEMATEL مشخص شده است که تغییر مکان و مود ارتعاشی سازه، تأثیرپذیرترین پارامتر و سختی پایه‌ها و کابل‌ها و همچنین رفتار میراگر جرمی تأثیرگذارترین پارامترها بوده‌اند. زمان تحلیل و پیچیدگی بسیار زیاد مدل‌سازی و تحلیل زمان‌بر، از محدودیت‌های تحقیق بوده است.

اطلاعات مقاله:

سابقه مقاله:

تاریخ دریافت: ۸ بهمن ماه ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۲۷ فروردین ماه ۱۴۰۵

تاریخ پذیرش: ۲۹ فروردین ماه ۱۴۰۵

تاریخ انتشار: ۱ مهر ماه ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

میراگر جرمی تنظیم‌شونده

شبکه عصبی توسعه‌یافته

روش DEMATEL

پل معلق

پل گلدن گیت

* آدرس ایمیل نویسنده مسئول: mirhamid.hosseini@srbiau.ac.ir

حقوق نشر این مقاله برای نویسنده(گان) محفوظ است و حقوق انتشار آن به انتشارات انجمن سازه‌های فولادی ایران واگذار شده است. محتوای این مقاله تابع قوانین و شرایط مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution 4.0 (CC-BY-NC 4.0) می‌باشد. برای اطلاعات بیشتر، لطفاً به وبسایت

<https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> مربوطه مراجعه فرمایید.



۱- مقدمه

پل‌های معلق بلنددهانه به دلیل انعطاف‌پذیری زیاد، نسبت سختی به جرم پایین، رفتار غیرخطی هندسی کابل‌ها و اندرکنش پیچیده میان برج‌ها، عرشه، کابل‌های اصلی و آویزها، از جمله پیچیده‌ترین سازه‌های مهندسی عمران محسوب می‌شوند. این ویژگی‌ها سبب شده که تحلیل رفتار لرزه‌ای این سازه‌ها همواره یکی از موضوعات مهم در مهندسی زلزله و تحلیل اجزای محدود باشد. رفتار این سازه‌ها تحت اثر بارهای دینامیکی ناشی از باد و زلزله به شدت غیرخطی بوده و وابسته به اندرکنش بین کابل‌ها، برج‌ها و عرشه است. پل گلدن‌گیت^۱ که در سال ۱۹۳۷ به بهره‌برداری رسید، با دهانه اصلی ۱۲۸۰ متر، یکی از شاخص‌ترین نمونه‌های پل‌های معلق جهان است. با توسعه روش اجزای محدود و نرم‌افزارهای پیشرفته‌ای مانند Abaqus، امکان مدل‌سازی دقیق رفتار دینامیکی این نوع سازه‌ها فراهم شده است. هدف این پژوهش، ایجاد یک مدل اجزای محدود از پل گلدن‌گیت مجهز به میراگر جرمی و بررسی پاسخ لرزه‌ای آن تحت رکوردهای زلزله است. در این پژوهش از روش‌های شبکه عصبی و روش DEMATEL^۲ نیز استفاده شده است. مطالعات اولیه رفتار لرزه‌ای پل گلدن‌گیت عمدتاً بر پایه مدل‌های تحلیلی دوجمله‌ای و تحلیل مودال کلاسیک انجام شدند. در این پژوهش‌ها، رفتار دینامیکی سازه با استفاده از مدل‌های ساده تیر-جرم و فرض رفتار خطی مورد بررسی قرار گرفت. اگرچه این مدل‌ها در تعیین فرکانس‌های طبیعی و مودهای ارتعاشی اولیه مفید بودند، اما توانایی شبیه‌سازی تغییرشکل‌های بزرگ، رفتار غیرخطی کابل‌ها و اثرات تحریک چندتکیه‌گاهی را نداشتند. به همین دلیل در این پژوهش رفتار غیرخطی پل مذکور در نرم‌افزار Abaqus بررسی شده است. با بررسی‌های انجام‌شده در مقالات مختلف و همچنین ویژگی‌های پل گلدن‌گیت مشخص است که تنها تعداد معدودی مدل‌سازی از پل مذکور انجام شده و دلیل آن پیچیدگی و سختی مدل‌سازی پل مذکور است؛ به همین علت محققین اندکی موفق شده‌اند پل مذکور را مدل‌سازی و تحلیل نمایند که یکی از چالش‌های اصلی این تحقیق تنها مدل‌سازی و تحلیل پل گلدن‌گیت بوده است. همچنین اثر میراگر جرمی تنظیمی در بهبود کاهش تغییر مکان‌های لرزه‌ای مشهود است.

۲- پیشینه تحقیق

پل گلدن‌گیت، یکی از مشهورترین پل‌های معلق جهان است که به دلیل دهانه اصلی بلند، رفتار دینامیکی پیچیده و قرارگیری در منطقه‌ای با خطر لرزه‌ای بالا، همواره به‌عنوان یکی از مهم‌ترین سازه‌های مورد مطالعه در مهندسی عمران شناخته شده است. این پل علاوه بر اهمیت حمل‌ونقلی، به‌عنوان یک سازه مرجع برای توسعه روش‌های تحلیل عددی، تحلیل دینامیکی، پایش سلامت سازه و ارزیابی عملکرد لرزه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. توسعه نرم‌افزارهای اجزای محدود مانند Abaqus، SAP2000، ANSYS و OpenSees امکان مدل‌سازی دقیق اجزای مختلف پل شامل برج‌ها، کابل‌های اصلی، آویزها و عرشه را فراهم کرده است. در سال‌های اخیر، محققان داخلی و خارجی مطالعات مربوطه را بر اساس کنترل نیمه‌فعال فازی انجام داده‌اند؛ که از جمله جدیدترین این پژوهش‌ها می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

تاکین^۳ و همکاران به مطالعه رفتار میراگرهای جرمی نیمه‌فعال بر اساس کنترل فازی پرداختند [۱].

آستانه‌اصل^۴ و همکاران رفتار پل گلدن‌گیت را در نرم‌افزار SAP2000 بررسی نمودند [۲].

ناکامورا^۵ و همکاران به مطالعه تحلیل رفتار سازه پل گلدن‌گیت پرداختند [۳].

کاسترو^۶ و همکاران در پژوهشی به مطالعه مدیریت ریسک در قلمروی ناشناخته: درس‌هایی از پل گلدن‌گیت برای عصر هوش مصنوعی پرداختند که جزء معدود تحقیقات در زمینه هوش مصنوعی بر روی پل گلدن‌گیت است [۴].

غفاری^۷ و همکاران در پژوهشی به تلفیق پلیمرهای هوشمند، دوقلوهای دیجیتال و هوش مصنوعی برای کاهش خوردگی و پایش سلامت سازه‌ای در زیرساخت‌های عظیم: مطالعه موردی پل گلدن‌گیت پرداختند [۵].

چن^۶ و همکاران در پژوهشی به مطالعه حل‌های تحلیلی و نتایج روش اجزای محدود (FEM^۷) برای پاسخ ارتعاشی تیر یک‌سرگیردار با دو فنر انتهایی تحت اثر حرکت تکیه‌گاه پرداختند که پل گلدن‌گیت نیز در پژوهش آن‌ها بررسی شد [۶].

مطالعات اخیر نشان می‌دهد که مدل‌سازی دقیق رفتار غیرخطی کابل‌ها، در نظر گرفتن اثرات تغییرشکل‌های بزرگ و اندرکنش میان اجزای سازه، نقش تعیین‌کننده‌ای در پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای

^۳ Takin^۴ Nakamura^۵ Castro^۶ Chen^۷ Finite Element Method^۱ Golden Gate Bridge^۲ Decision Making Trial and Evaluation Laboratory

زمان مدل‌سازی را کاهش داده و دقت هندسی مدل را افزایش می‌دهد [۱۱].

همچنین زونمت^۵ و همکاران از روش‌های بهینه‌سازی برای به‌روزرسانی مدل اجزای محدود استفاده کردند [۱۲]. نتایج آن‌ها نشان داد که الگوریتم‌های هوشمند می‌توانند پارامترهای مدل را به‌گونه‌ای تنظیم کنند که اختلاف میان پاسخ عددی و پاسخ واقعی سازه به حداقل برسد.

در پژوهش‌های اخیر، نرم‌افزارهای SAP2000، Abaqus، MATLAB و OpenSees بیش‌ترین کاربرد را در تحلیل پل‌های معلق داشته‌اند. Abaqus به‌دلیل قابلیت تحلیل غیرخطی هندسی و مصالح، برای مدل‌سازی کابل‌ها و اتصالات مناسب است؛ SAP2000 بیش‌تر برای طراحی و تحلیل سازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ درحالی‌که OpenSees در تحلیل‌های غیرخطی لرزه‌ای و MATLAB در توسعه الگوریتم‌های اختصاصی، تحلیل مودال، تحلیل تاریخچه زمانی و کاربرد روش‌های هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی و الگوریتم ژنتیک نقش مهمی ایفا می‌کنند. بررسی مطالعات نشان می‌دهد که برخی پژوهش‌های انجام‌شده بر توسعه مدل‌های اجزای محدود، به‌روزرسانی مدل، تحلیل دینامیکی و پایش سلامت سازه متمرکز بوده‌اند. با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه، هنوز پژوهش‌های محدودی به تلفیق مدل‌سازی دقیق پل گلدن‌گیت در Abaqus، بهینه‌سازی و تحلیل چند رکوردی لرزه‌ای پرداخته‌اند. بنابراین، توسعه یک مدل دقیق اجزای محدود همراه با تحلیل تاریخچه زمانی تحت چند رکورد زلزله و استفاده از روش‌های یادگیری ماشین، می‌تواند به‌عنوان یکی از شکاف‌های پژوهشی مهم در این حوزه مطرح شود. در مطالعات و تحقیقات گذشته در رابطه با مدل‌سازی سه بعدی دقیق پل معلق مجهز به میراگر جرمی با استفاده از تکنیک DEMATEL تحت اثر توام رکوردهای لرزه‌ای حوزه دور از گسل، پژوهشی انجام نشده است؛ لذا در این پژوهش پل معلق گلدن‌گیت مجهز به میراگر جرمی تنظیمی در نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus با دقت بالایی مدل‌سازی و تحلیل شده است که با محیط سیمولینک نرم‌افزار MATLAB در کنترل سازه پل به‌صورت توام در ارتباط بوده که در نوع خود کم‌نظیر است و رویکرد ترکیبی DEMATEL و DNN^۶ برای اولین بار بر روی این پل پیاده‌سازی شده است.

پل‌های معلق دارد. یکی از نخستین مدل‌های جامع دینامیکی پل گلدن‌گیت توسط گیم^۱ و همکاران ارائه شده است [۷]. در این پژوهش، مدل سه‌بعدی کاملی از پل با استفاده از روش اجزای محدود توسعه یافت که در آن عرشه، برج‌ها، کابل‌های اصلی، کابل‌های آویز و سیستم مهاربندی به‌صورت یکپارچه مدل‌سازی شدند. نتایج نشان داد که مدل قادر است فرکانس‌های طبیعی، شکل مودها و پاسخ دینامیکی پل را با دقت مناسبی پیش‌بینی کند. این مطالعه به‌عنوان یکی از مراجع اصلی در مدل‌سازی عددی پل گلدن‌گیت شناخته می‌شود.

در ادامه این روند، آلونسو^۲ و همکاران نشان دادند که به‌روزرسانی مدل اجزای محدود بر اساس داده‌های مودال، دقت پیش‌بینی رفتار پل‌های کابلی را به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌دهد [۸]. در این روش، پارامترهای مدل از طریق مقایسه پاسخ عددی و داده‌های آزمایشگاهی اصلاح می‌شوند و مدل نهایی، رفتار واقعی سازه را بهتر بازنمایی می‌کند؛ همچنین تحلیل لرزه‌ای پل‌های معلق یکی از مهم‌ترین زمینه‌های پژوهشی در سال‌های اخیر است.

برخلاف پل‌های معمولی، در پل‌های معلق رفتار دینامیکی کابل‌ها، تغییرشکل‌های بزرگ و اثرات هندسی غیرخطی باید به‌طور هم‌زمان در تحلیل لحاظ شود. در بسیاری از مطالعات، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به‌عنوان دقیق‌ترین روش ارزیابی عملکرد لرزه‌ای معرفی شده است. نئوپن^۳ و همکاران با استفاده از مدل‌های سه‌بعدی اجزای محدود نشان دادند که مدل‌سازی دقیق رفتار اتصالات و اعضای پس‌کشیده می‌تواند بر نتایج تحلیل لرزه‌ای تأثیر قابل‌توجهی داشته باشد [۹]. اگرچه پژوهش آنان بر روی یک پایه پل انجام شده است، اما روش مدل‌سازی ارائه‌شده قابلیت استفاده در تحلیل پل‌های بزرگ مانند پل گلدن‌گیت را نیز دارد.

علاوه بر این، مطالعات مختلف ازجمله گزارش آشتو^۴ نشان داد که استفاده از چند رکورد زلزله واقعی و هم‌پایه‌سازی آن‌ها با طیف طرح، نتایج قابل‌اعتمادتری نسبت به استفاده از یک رکورد منفرد ایجاد می‌کند [۱۰].

یکی از مهم‌ترین تحولات سال‌های اخیر، استفاده از داده‌های اسکن لیزری و ابرنقاط برای تولید خودکار مدل‌های اجزای محدود است. هجار و همکاران روشی پارامتریک برای ایجاد مدل اجزای محدود پل‌های فولادی از داده‌های ابرنقاط ارائه کردند که

^۵ Zounemat

^۶ Developmental Neural Network

^۱ Game

^۲ Alonso

^۳ Neupan

^۴ AASHTO

۳- بررسی معادلات دینامیکی

در این پژوهش، برای بررسی مؤثر بودن روش کنترلی پیشنهادی، از یک مثال عددی استفاده شده است. یک پل معلق در سانفرانسیسکو آمریکا به نام گلدن گیت مورد ارزیابی قرار گرفته است و از یک کنترل کننده منطق فازی نوع ۲ برای تولید نیروی کنترل در میراگر جرمی استفاده شده است. در وسط دهانه پل، دو میراگر جرمی طراحی شده است؛ زیرا در وسط پل جابه‌جایی عرضی به حداکثر می‌رسد. سازه مذکور تحت اثر تحریک هفت زلزله حوزه دور قرار گرفته است. برای نوشتن معادلات حرکت دینامیکی پل معلق گلدن گیت تحت اثر شتاب قائم و افقی زلزله که به صورت تحریکات تکیه‌گاهی به اجزای پل وارد می‌شود، از روش مدل‌سازی در نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus استفاده شده و بر اساس اصل انرژی، ماتریس‌های سختی و جرم سازه پل حاصل شده است. کل عرشه پل به صورت تیرهای دوسر مفصل ساده در نظر گرفته شده است که توسط تعدادی آویز معلق^۱ به کابل اصلی آویزان شده و در محل برج‌ها که در واقع تکیه‌گاه‌های میانی هستند به صورت مفصلی تکیه داده می‌شوند. هر المان شامل دو گره و هر گره شامل دو درجه آزادی تغییر مکان قائم و تغییر مکان خمشی است؛ لذا ماتریس‌های جرم و سختی به صورت کوپله می‌باشد. ماتریس جرم پل به صورت ماتریس جرم متمرکز در نظر گرفته خواهد شد، که در نهایت ماتریس جرم به صورت یک ماتریس $n \times n$ تبدیل می‌شود، که (n) تعداد درجات آزادی قائم آزاد پل در حرکت دینامیکی سیستم است. با توجه به محاسبه انرژی پتانسیل کل هر المان، ماتریس سختی هر المان به دست می‌آید که با سرهم‌کردن (Assembly) تمام ماتریس‌ها، ماتریس سختی کل پل به دست خواهد آمد و در نهایت معادله دینامیکی پل در مقابل زلزله به صورت زیر نوشته می‌شود [۶]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{r\}\ddot{u}_g \quad (۱)$$

که $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی پل معلق هستند. ماتریس میرایی $[C]$ نیز متناسب با ماتریس‌های جرم و سختی سازه پل در نظر گرفته می‌شود که با استفاده از رابطه رایلی به صورت زیر نوشته می‌شود [۷]:

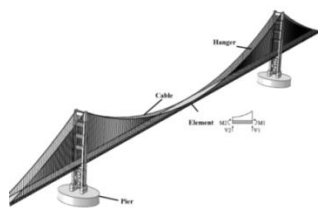
$$[C] = a_0[M] + b_0[K] \quad (۲)$$

$$a_0 = \xi_i \times \frac{2\omega_i \times \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (۳)$$

$$b_0 = \xi_j \times \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (۴)$$

که (a_0) و (b_0) به ترتیب ضریب تناسب جرم و سختی، (ω_i) و (ω_j) به ترتیب فرکانس مودهای i ام و j ام پل، (ξ_i) و (ξ_j) به ترتیب درصد میرایی سازه‌ای این دو مود هستند. در این پژوهش، برای کاهش تغییر مکان قائم پل‌های معلق در مقابل حرکت‌های ناشی از شتاب قائم زلزله از سیستم کنترل نیمه فعال میراگر جرمی استفاده شده است. این سیستم در ساده‌ترین حالت شامل یک جرم، فنر و میراگر به همراه یک سیستم اعمال نیروی فعال به جرم است که معمولاً در درجات آزادی وسط دهانه‌ها نصب می‌شود. با افزودن هریک از این سیستم‌های الحاقی به عرشه پل، در واقع یک درجه آزادی به پل اضافه می‌شود. در این حالت می‌توان معادله حرکت سیستم را به شکل زیر نوشت:

$$[M_{TB}]\{\ddot{u}\} + [C_{TB}]\{\dot{u}\} + [K_{TB}]\{u\} = -[M_{TB}]\{\ddot{u}_g(t)\} + \{D\}F \quad (۵)$$



شکل ۱- مدل سه بعدی پل گلدن گیت

که (F) نیروی فعال وارد به جرم TMD، $\{D\}$ بردار موقعیت است که محل تأثیر نیروی فعال F را نشان می‌دهد و مقدار آن در درجات آزادی محل اثر F در بازه محدوده فازی $[۰, ۱]$ است؛ $[M_{TB}]$ ، $[K_{TB}]$ و $[C_{TB}]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی مربوط به کل سیستم مرکب حاصل است که شامل خود سازه و سیستم میراگر جرمی است. همه ماتریس‌های مربعی به ابعاد $(n+m) \times (n+m)$ هستند که (n) تعداد درجات آزادی سازه و (m) تعداد میراگر جرمی است. برای حل معادلات مرتبه دوم (۱) و (۵) به منظور تعیین پاسخ‌های سازه در حالت کنترل شده و تعیین سیستم تک و چند درجه آزادی با رفتار دوخطی الاستیک تحت ارتعاشات آزاد و رفتار الاستوپلاستیک کامل و سخت‌شونده تحت بار زلزله‌های حوزه دور از گسل از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است و پاسخ‌های به دست آمده برای ولتاژ ورودی در میراگر

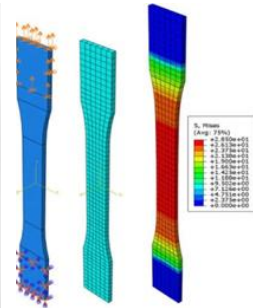
^۱ Hangers

جدول ۱- خصوصیات غیرخطی فولاد پل گلدن گیت

Material	فولاد آلیاژی
Modulus of Elasticity	2×10^5 (MPa)
Poisson's Ratio	0.3
Tensile Strength	520 (MPa)
Yield Strength	360 (MPa)



تست کشش مستقیم فولاد



مدل سازی تست کشش

جرمی تنظیم شونده به وسیله روش فازی نوع ۲ با حلگر ماتریسی و توابع عضویت تعریف شده در حالت های کنترل شده و کنترل نشده تعریف و محاسبه شده است. مدل سازی رفتار غیرخطی و هیستریزیس سازه پل معلق با در نظر گرفتن هفت رکورد لرزه ای حوزه دور در نرم افزار اجزای محدود Abaqus و به صورت سه بعدی مدل سازی شده است. در شکل (۱) سازه واقعی و ابعاد پل گلدن گیت مشاهده می شود. برای وارد کردن رفتار تنش- کرنش در Abaqus باید از داده های مربوط به تست کشش استفاده نمود که توسط تست کشش مقادیر تنش مهندسی و کرنش مهندسی به دست می آیند در حالی که در Abaqus باید مقادیر تنش و کرنش حقیقی در مازول خصوصیات مصالح وارد شود برای تبدیل تنش-کرنش مهندسی به تنش-کرنش حقیقی از روابط زیر استفاده می شود:

$$\epsilon = \ln(1 + e) \quad (۶)$$

$$\sigma = S(1 + e) \quad (۷)$$

۴- هندسه پل گلدن گیت
مشخصات پل کابلی گلدن گیت طبق جدول (۲) مدل سازی و تحلیل شده است. این پل در مجاورت گسل سن آندریاس^۱ قرار داشته و در معرض خطر لرزه ای قابل توجهی است. طول کلی پل ۱۹۷۰ متر بوده، طول دهانه پل ۱۲۸۰ متر، ارتفاع ستون پل ۲۳۰ متر و فاصله ستون پل تا تکیه گاه ۳۴۵ متر است. لذا بررسی رفتار غیرخطی پل در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

با استفاده از روابط بالا تنش و کرنش مهندسی به تنش و کرنش حقیقی تبدیل و به نرم افزار Abaqus معرفی شده است؛ به منظور مدل سازی واقعی تر پل گلدن گیت خصوصیات غیرخطی پل با آزمون تست کشش مستقیم فولاد در نرم افزار Abaqus صحت سنجی شده است. در جدول (۱) خصوصیات غیرخطی فولاد پل گلدن گیت دیده می شود.

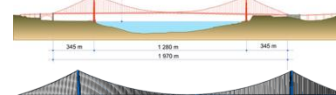
جدول ۲- مشخصات پل گلدن گیت

طول کلی پل	طول دهانه پل (m)	فاصله ستون پل تا تکیه گاه (m)	ارتفاع ستون پل (m)
۱۹۷۰ متر	۱۲۸۰	۳۴۵	۲۳۰

تصویر واقعی پل گلدن گیت



ابعاد پل گلدن گیت



مدل سازی پل گلدن گیت در نرم افزار Abaqus



ضخامت کابل های اصلی پل گلدن گیت به میزان ۹۲ سانتی متر

^۱ San Andreas Fault

تعداد المان‌های مدل‌سازی پل ۱۱۲۳۳۷ المان و تعداد گره‌ها ۱۰۶۲۰۳ گره بوده است. برای مدل‌سازی المان Shell عرشه‌ها از المان S4R و مدل‌سازی برج‌ها از المان B31 و مدل‌سازی اتصالات از المان T3D2 استفاده شده است. برای مش‌بندی بهینه ابتدا ابعاد مش‌ها بسیار درشت فرض شده است و به مرور با ریز نمودن مش‌ها به محدوده‌ای می‌رسیم که این امر تأثیری در جواب نهایی نخواهد داشت و آن میزان مش، تعداد بهینه مش است که در این پژوهش تعداد ۱۱۲۳۳۷ المان مش‌بندی استفاده شده است. برای اعمال نیروی پیش‌تندگی در کابل‌ها در ماژول Load در نرم‌افزار Abaqus از قسمت Predefined Field نیروهای پیش‌تندگی لحاظ شده است.

۵-۱- مقدار نیروی کابل اصلی

بر اساس هندسه و بارگذاری متعارف پل، برای هر یک از دو کابل اصلی، مقدار نیروی افقی در ناحیه نزدیک وسط دهانه حدود $H \approx 47,246$ kips و نیروی کششی بیشینه در نزدیکی برج‌ها حدود $T_{max} \approx 56,400$ kips است. این مقادیر از یک مدل پارابولیک^۱ با دهانه حدود (ft) ۱۵۰، خیز حدود (ft) ۶۴ و بار گسترده (kip/ft) ۱۱/۱ به دست می‌آیند. با تبدیل واحد:

$$47,246 \text{ (kip)} \approx 210,200 \text{ (kN)}$$

$$56,400 \text{ (kip)} \approx 250,900 \text{ (kN)}$$

بنابراین، برای هر کابل اصلی می‌توان به صورت تقریبی گفت که نیروی کششی در محدوده ۲۱۰ تا ۲۵۱ مگانیوتن قرار دارد؛ مقدار دقیق به محل مورد نظر روی کابل و وضعیت بارگذاری بستگی دارد. این عدد را نباید مستقیماً به عنوان یک Pre-Tension Load ثابت در تمام طول کابل وارد نمود. کابل اصلی دارای شکل کاتتری است و مؤلفه افقی نیرو تقریباً ثابت می‌ماند؛ درحالی‌که مقدار نیروی کل کابل در نقاط مختلف به دلیل تغییر زاویه کابل متفاوت است. اطلاعات رسمی پل نشان می‌دهد که هر کابل اصلی حدود ۲۷۵۷۲ سیم فولادی با قطر ۰/۱۹۲ اینچ دارد و قطر نهایی کابل با پوشش حدود ۰/۹۲ متر است. همچنین دهانه اصلی پل ۱۲۸۰ متر است. مساحت مؤثر مقطع فولادی، با صرف نظر از فضای خالی بین سیم‌ها، برابر است با:

$$A_s = 275724(\pi d^2)/4 \quad (9)$$

^۱ Parabolic

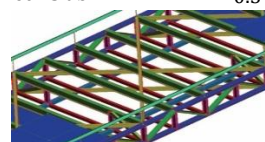
مدل‌سازی پل گلدنگیت، به صورت سه بعدی انجام شده است. در تصاویر جدول (۲) این مدل‌سازی دیده می‌شود. یکی از چالش‌های مدل‌سازی در پل قسمت سرهم‌بندی یا اسمبلی در نرم‌افزار است که با دقت بالایی در طی چندین ماه این مدل‌سازی انجام شده است و اندرکنش‌ها نیز جزء سایر چالش‌های مدل‌سازی بوده‌اند که در نهایت با قید تماسی Tie قسمت‌هایی که به یکدیگر اتصال داشته‌اند مدل‌سازی شده تا زمان تحلیل کاهش قابل ملاحظه‌ای یابد. در جدول (۳) مشخصات مقاطع پایه‌ها و کابل‌های پل گلدنگیت دیده می‌شود.

۵- مدل‌سازی پل گلدنگیت در نرم‌افزار Abaqus

در نرم‌افزار Abaqus مدل‌سازی سه بعدی انجام شده است که این مدل شامل: دو برج اصلی، کابل‌های اصلی، کابل‌های آویز، عرشه و تکیه‌گاه‌ها است. همچنین برای افزایش دقت مدل از المان‌های Beam برای برج‌ها، Truss/Cable برای کابل‌ها، Shell برای عرشه و Connector برای اتصالات استفاده شده است؛ برای شرایط مرزی پایه برج‌های گیردار، اتصال کابل‌ها به برج‌های مفصلی و کابل‌ها دارای پیش‌تندگی اولیه مدل‌سازی شده‌اند. در جدول (۳) مشخصات مقاطع پایه‌ها و کابل‌های پل گلدنگیت مشاهده می‌شود. مدل ابتدا در SolidWork ترسیم و سپس به Abaqus منتقل شده است.

جدول ۳- مشخصات مقاطع پایه‌ها و کابل‌های پل گلدنگیت

Details of the Structural Elements	Available Strutural Element Sizes
Green Cross Girder	2500UB3650
Red Cross Girder	1200x500x50 RHS
Blue Top Bottom chords	1400x700x75 RHS
Yellow Cross Bracing	1200x500x50 RHS
Green Cross Bracing	500x250x50 RHS
Blue Main Girders	1000x1000x100 SHS
Pink Vertical Members	500UB667
Vertical Cables	0.126m Diameter
Caternary Cables	0.92m Diameter
Pylons	16000x10000
Pylon Diagonal Bracing	2500x2500
Pylon Cross Bracing	8000x4000
Bridge Deck Slab	0.5 m Thick



بنابراین:

$$A_s \approx 0.514 \text{ (m}^2\text{)}$$

همچنین مشخصات فولاد سیم‌های کابل در منابع منتشر شده

حدوداً برابر با مقادیر زیر است:

$$F_y = 182.6 \text{ (ksi)} \approx 1259 \text{ (MPa)}$$

$$F_u = 235.6 \text{ (ksi)} \approx 1624 \text{ (MPa)}$$

نیروی کابل اصلی بر اساس جدول (۴) محاسبه شده است.

جدول ۴- مشخصات مدل Abaqus و نیروی کابل

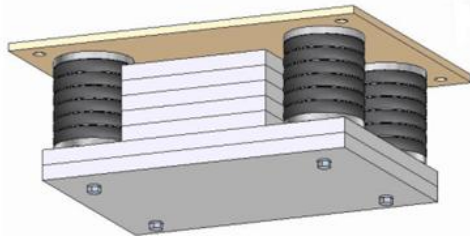
تعداد	پارامتر
27572	تعداد سیم در هر کابل
4.87 mm	قطر هر سیم
0.514 m ²	مساحت فولاد کابل
≈ 1,259 MPa	فولاد (F _y)
≈ 1,624 MPa	فولاد (F _u)
210,161 kN	نیروی افقی کابل (H)
250,880 kN	حداکثر نیروی محاسباتی کابل
≈ 280,238 kN	ظرفیت نیروی کششی کابل

$$c_d = 2\zeta d_m d \omega_d$$

(۱۳)

بنابراین:

$$c_d \approx 2.87 \times 10^5 \text{ (Ns/m)}$$



شکل ۲- مدل میراگر جرمی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار Abaqus

جدول ۵- پارامترهای مدل‌سازی TMD

پارامتر	جرم TMD (kg)	f _d (Hz)	k _d (N/m)	(ζ _d)	c _d (N·s/m)
TMD	45000	0.106	(1.91×10 ⁶)	0.05	(2.87×10 ⁵)

۶- صحت‌سنجی پل گلدن‌گیت در نرم‌افزار Abaqus با

مقالات و مدل‌های دینامیکی گذشته

به‌منظور صحت‌سنجی از مقاله [آستانه‌اصل](#) درخصوص پل گلدن‌گیت استفاده شده است [۲]. همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، تفاوت اندکی بین خروجی مودهای ارتعاشی مدل‌سازی انجام‌شده توسط مرجع [۲] با این پژوهش وجود دارد؛ و به‌دلیل همین اختلاف کم، صحت مدل‌سازی در نرم‌افزار Abaqus مورد تأیید است. لازم به ذکر است برای دقت و کنترل مضاعف در صحت‌سنجی از گزارش شماره 93 UBC/EERC دانشگاه برکلی درخصوص تحلیل طیف پاسخ پل گلدن‌گیت نیز که به‌روش حل معادلات ریاضی پل را تحلیل نموده، استفاده شده است [۳]. معادلات حرکت پل ساده‌سازی شده است به همین علت، مودهای ارتعاشی اندکی نسبت به مدل‌سازی‌های نرم‌افزاری در نرم‌افزار SAP2000 مقاله [آستانه‌اصل](#) و مدل‌سازی در نرم‌افزار Abaqus مقاله حاضر، بیش‌تر است. در جدول (۶) مقایسه مودهای ارتعاشی پل گلدن‌گیت و صحت‌سنجی آن دیده می‌شود. با توجه به آن‌که در مقالات موجود تنها مودهای ارتعاشی تحلیل شده است، لذا برای صحت‌سنجی این موضوع انجام شده است و چنانچه مدل‌های غیرخطی در مقالات موجود، وجود داشت، باید صحت‌سنجی بر آن مبنا انجام می‌پذیرفت که متأسفانه در مقالات مرجع، مدل‌سازی غیرخطی و تحلیل غیرخطی انجام نشده است.

این نیرو نباید به‌صورت یک نیروی متمرکز در دو انتهای کابل وارد شود؛ لذا با Initial Stress/Initial Strain یا یک مرحله تحلیل Form-Finding، حالت تنش اولیه کابل ایجاد می‌شود. مدل ابتدا در SolidWork ترسیم و سپس به Abaqus منتقل شده است.

۵-۲- پارامترهای TMD

داده‌های پایش واقعی نشان می‌دهند که نخستین فرکانس قائم پل گلدن‌گیت حدود f₁=0.106 (Hz) است. همچنین فرکانس‌های قائم بعدی حدود ۰/۱۳۲، ۰/۱۷۰ و ۰/۲۱۶ هرتز گزارش شده‌اند. برای کنترل مود اول قائم:

$$f_d = f_1 = 0.106 \text{ (Hz)} \quad (۱۰)$$

$$\omega_d = 2\pi f_d \quad \omega_d = 0.666 \text{ (rad/s)} \quad (۱۱)$$

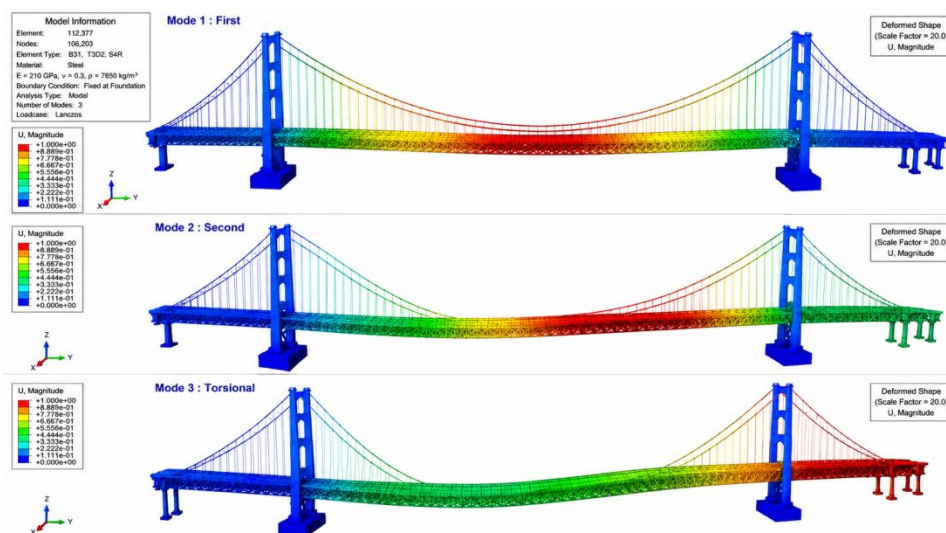
اگر جرم TMD برابر ۱ درصد جرم مؤثر تقریبی دهانه اصلی انتخاب شود (m_d ≈ 45000 (kg)، آنگاه سختی TMD از رابطه (۱۲) به‌دست می‌آید:

$$k_d = m_d \omega_d^2; \quad k_d \approx 1.91 \times 10^6 \text{ (N/m)} \quad (۱۲)$$

در شکل (۳) خروجی مودهای ارتعاشی پل گلدن گیت در نرم‌افزار Abaqus مشاهده می‌شود.

جدول ۶- مقایسه مودهای ارتعاشی پل گلدن گیت و صحت‌سنجی آن

گزارش شماره	مقاله	مدل‌سازی نرم‌افزاری مقاله حاضر در	مود ارتعاشی
UBC/EERC-93/05	آستانه‌اصل	نرم‌افزار Abaqus (s)	
دانشگاه برکلی در خصوص تحلیل	[۲] (s)		
طیف پاسخ پل گلدن گیت [۳]			
(s)			
۲۰/۵۶	۱۷/۵	۱۶/۹	۱
۱۲/۶۳	۹/۵	۹/۱	۲
۱۲/۶۱	۹/۴	۸/۹	۳
۱۱/۷۶	۸/۷	۸/۳	۴
۸/۹	۷/۶	۷/۴	۵



شکل ۳- خروجی سه مود اول ارتعاشی پل گلدن گیت در نرم‌افزار Abaqus

۷- شرایط مرزی و مش‌بندی پل گلدن گیت در نرم‌افزار Abaqus

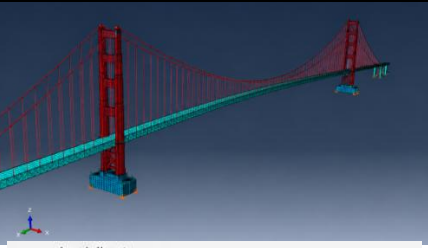
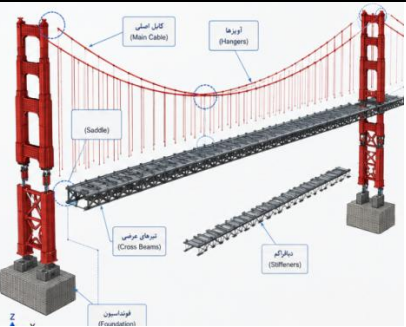
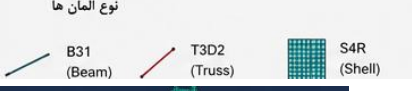
مدل پل گلدن گیت با المان Solid سه‌بعدی مطابق شکل‌های جدول (۷) مدل‌سازی شده است. شرایط مرزی لرزه‌ای به پایه‌های پل گلدن گیت مطابق با شکل اعمال شده است. نیروی لرزه‌ای به پایه پل وارد می‌شود. همان‌طور که در شکل‌های جدول (۷) قابل مشاهده است، خصوصیات دقیق اتصالات نیز ذکر شده است. همچنین نوع مش‌بندی نیز در جدول (۷) اشاره شده که مش‌بندی از نوع بهینه بوده و با ایجاد مقطع، مش‌های منظم و دقیقی به‌دست آمده است؛ که با این مش‌بندی صحیح، سرعت تحلیل بالاتر رفته

و خطای محاسباتی به میزان زیادی کاهش پیدا می‌کند. چون المان مدل‌سازی از نوع Solid و سه‌بعدی بوده، لذا مش‌بندی از نوع سه‌بعدی انتخاب شده است. برای به‌دست‌آوردن مش‌بندی بهینه، باید یک بار ثابت به قسمتی از سازه وارد شود و به ترتیب با افزایش تعداد مش‌ها میزان تغییرات تنش‌ها بررسی شود. اگر میزان تغییرات خیلی کم باشد می‌توان مش‌بندی بهینه را تعیین نمود. نوع مش‌بندی یکی از موضوعات مهم در دقت خروجی‌ها است؛ لذا در این مدل‌سازی از سه نوع المان مش‌بندی طبق جدول (۸) استفاده شده است و مش‌بندی از نوع بهینه است. در شکل‌های

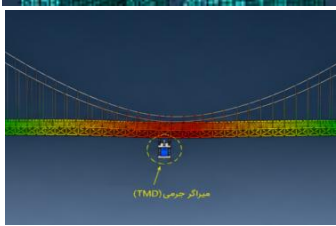
P Delta و میرایی رایلی نرم افزار در قسمت تغییر مکان های بزرگ در نرم افزار Abaqus در نظر گرفته شده است. در جدول (۸) نوع المان های مدل سازی شده پل گلدن گیت در نرم افزار Abaqus دیده می شود.

جدول (۸) میراگر جرمی مدل سازی شده در نرم افزار Abaqus مشاهده می شود که در میانه دهانه پل گلدن گیت قرار گرفته است. برای مدل سازی کابل ها و آویزها از المان Wire استفاده شده است. به منظور اعمال نیروی پیش تنیدگی در کابل ها در ماژول Load در نرم افزار Abaqus از قسمت Predefined Field نیروهای پیش تنیدگی استفاده شده است. نوع هندسه غیر خطی نیز از نوع NL geom در نرم افزار لحاظ شده است و اثرات مربوط به

جدول ۷- نحوه مدل سازی و مش بندی و شرایط مرزی پل گلدن گیت

نوع	تصویر سه بعدی	جزئیات اتصالات
شرایط اولیه		
مش بندی بهینه پل گلدن گیت		

جدول ۸- نوع المان های مدل سازی شده

نوع المان مدل سازی	نوع سازه
المان ۱۰ گرهی C3D10	
المان ۸ گرهی C3D8R میراگر جرمی	
المان T3D2 مدل سازی کابل ها	

۸- هم‌پایه‌سازی رکورد لرزه‌ای حوزه دور

مورد استفاده در تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی مشاهده می‌شود
[۱۳ و ۱۴].

رکوردهای لرزه‌ای حوزه دور از سایت PEER داندلود و انتخاب شده و بر مبنای دستورالعمل آیین‌نامه ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) هم‌پایه‌سازی شده که در جدول (۹) رکوردهای لرزه‌ای حوزه دور

جدول ۹- رکوردهای لرزه‌ای حوزه دور استفاده در تحلیل‌های غیرخطی

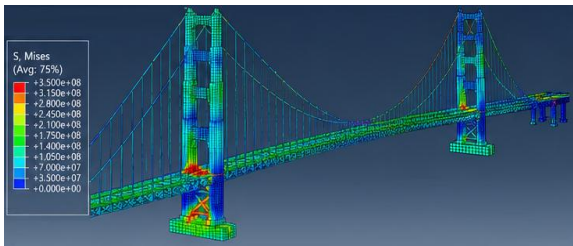
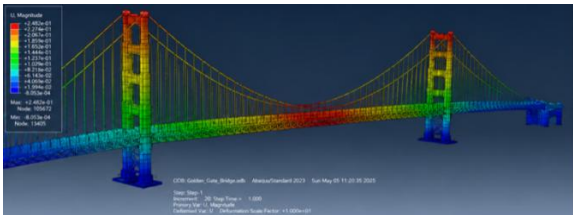
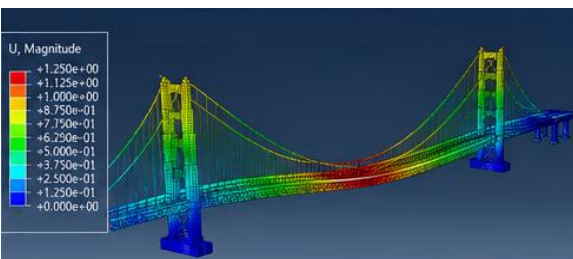
ضرایب هم‌پایه‌سازی	سال	شماره ایستگاه ثبت رکورد	بزرگا	رکورد لرزه‌ای	فاصله از مرکز زلزله
1.98	1994	Beverly hills- Mulhol	6.7	Northridge	26.5
2.1	1979	Delta- UNAMUCSD	6.5	Imperial valley	33.7
1.97	1995	Nishi-Akashi	6.9	Kobe, japan	29.4
1.88	1999	Duzce	7.5	Kocaeli, Turkey	19.2
1.64	1992	Yermo Fire Station	7.3	Landers	19.7
1.85	1989	Capitola	6.9	Loma prieta	31.4
1.71	1992	Rio Dell Overpass	7	Cape mendocino	22.7

۹- خروجی رکوردهای لرزه‌ای

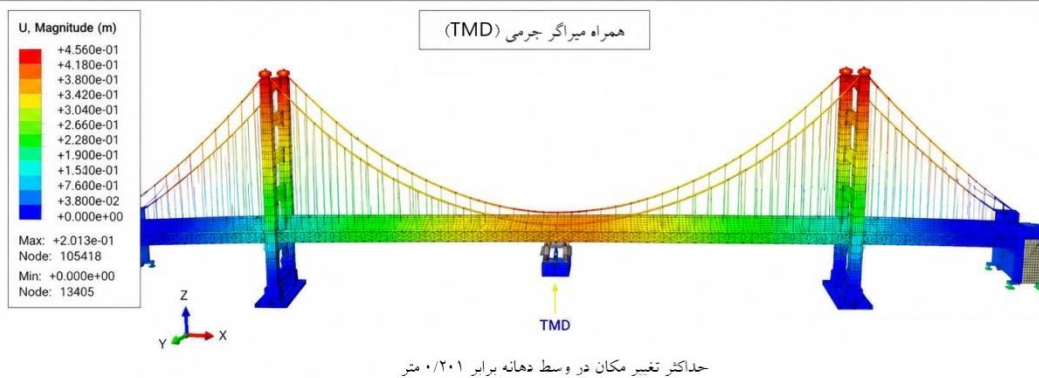
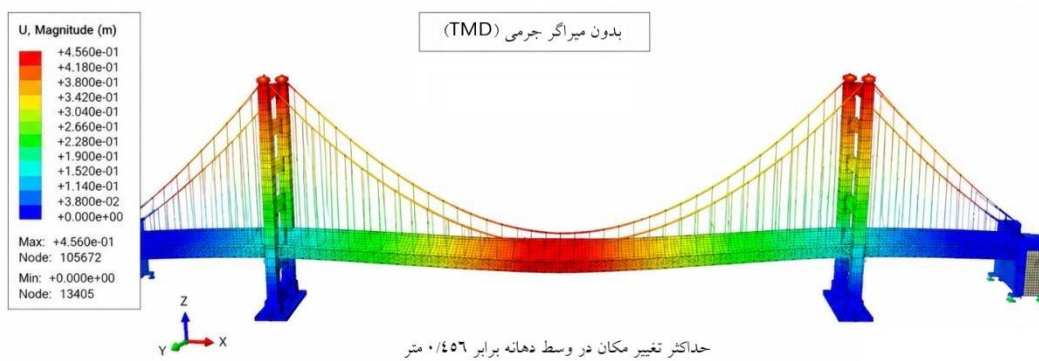
لرزه‌ای در وسط دهانه پل دیده می‌شود که واحد آن به متر است. لازم به ذکر است میراگر جرمی در کاهش تغییر مکان لرزه‌ای نقش مؤثری به میزان متوسط ۳۵ درصد داشته است و رفتار میراگر جرمی موجب کاهش پاسخ پل شده است.

پس از اعمال رکورد لرزه‌ای، خروجی حاصل از نرم‌افزار Abaqus به‌دست خواهد آمد. در جدول (۱۰) اشکال خروجی تغییر مکان

جدول ۱۰- خروجی تغییر مکان‌های پل گلدن گیت

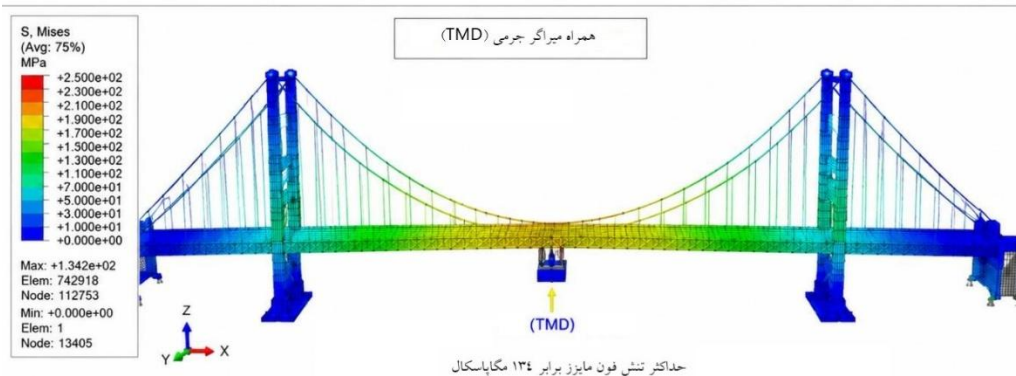
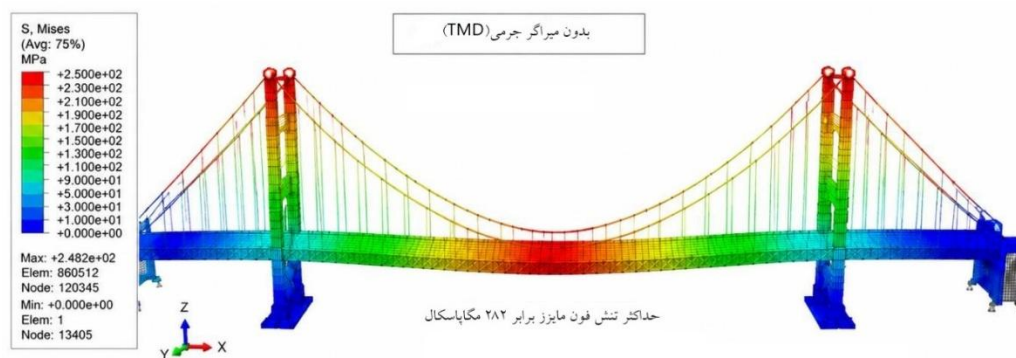
نوع	تنش‌های فون‌مایز ^۱ و تغییر مکان‌ها
تنش‌های فون‌مایز پل گلدن گیت	
تغییر مکان‌های پل گلدن گیت	
تغییر مکان‌های لرزه‌ای پل گلدن گیت بدون میراگر جرمی	

^۱ von Mises Stresses



شکل ۴- خروجی تغییر مکان لرزه‌ای پل گلدن گیت ناشی از زلزله Kocaeli

در شکل (۵) خروجی تنش فون مایز پل گلدن گیت در نرم افزار Abaqus دیده می شود.



شکل ۵- خروجی تنش های ناشی از تحریکات لرزه‌ای در پل گلدن گیت ناشی از زلزله Kocaeli

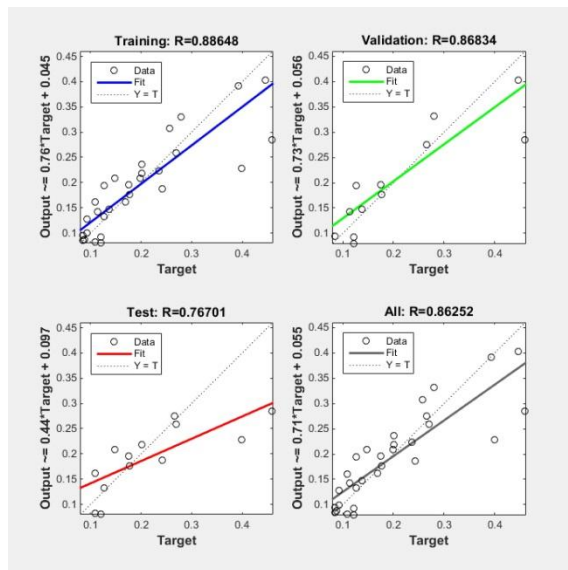
۱۰- شبکه عصبی

ANN^۱ را شبکه عصبی مصنوعی می‌نامند. ANN یک مدل ریاضیاتی است که از ساختار طبیعی و بیولوژیکی مغز انسان الهام گرفته شده است. شبکه‌های عصبی، سیستم‌ها و روش‌های محاسباتی نوینی برای بیش‌بینی پاسخ‌های خروجی از سامانه‌های پیچیده هستند. عنصر کلیدی این ایده، ایجاد ساختارهایی جدید برای سامانه پردازش اطلاعات است. این سیستم از شمار زیادی عناصر پردازشی فوق‌العاده به هم پیوسته به نام نرون تشکیل شده است که برای حل یک مسئله با هم هماهنگ عمل می‌کنند و توسط سیناپس‌ها (ارتباط‌های الکترومغناطیسی) اطلاعات را منتقل می‌کنند. در این شبکه‌ها اگر یک سلول آسیب ببیند، باقی سلول‌ها می‌توانند نبود آن را جبران کرده و نیز در بازسازی آن سهیم باشند. این شبکه‌ها قادر به یادگیری هستند؛ با استفاده از الگوریتم‌هایی که برای آنها تعریف می‌شود، سیستم می‌آموزد که خطای خود را اصلاح کند. یادگیری در این سیستم‌ها به صورت تطبیقی صورت می‌گیرد؛ یعنی با استفاده از مثال‌ها وزن سیناپس‌ها به گونه‌ای تغییر می‌کند که در صورت دادن ورودی‌های جدید، سیستم پاسخ درستی تولید کند. شبکه عصبی می‌تواند برای تحلیل مسائل غیرخطی و بیان ارتباط ما بین داده‌های ورودی و خروجی مورد استفاده قرار گیرد [۱۲].

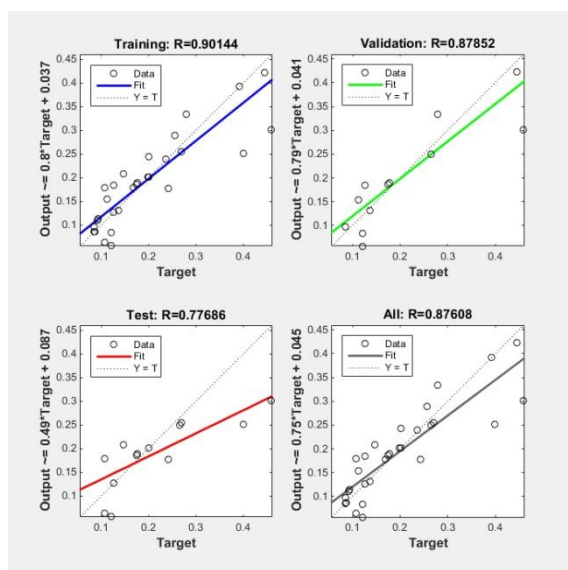
۱۰-۱- روش شبکه عصبی توسعه یافته پیشنهادی در این تحقیق (DNN) برای تحلیل پل گلدن گیت با دقت بالای ۹۰ درصد

در این تحقیق کد ارتقایافته (DNN) که در محیط برنامه MATLAB تهیه شده، توضیح داده می‌شود. با توجه به ساختار ترکیب، آموزش و کد رایج شبکه عصبی داخل MATLAB، بعد از هر بار آموزش شبکه‌ها میزان رگرسیون و خطای داده‌ها تغییر می‌کند و حتی این امکان وجود دارد شرایطی که تحت آن شبکه‌ای با رگرسیون بالا به دست آمده است با اجرای مجدد نتایجی به مراتب ضعیف‌تر از قبل را نشان دهد. بنابراین در این تحقیق با استفاده از کد (DNN) به بهینه‌سازی عملکرد این شبکه پرداخته شده است تا همواره با سعی و خطا از بین تمام پاسخ‌ها، شبکه‌ای که بهترین رگرسیون و کم‌ترین خطا را ارائه می‌دهد، به عنوان خروجی انتخاب شده و ترسیم نماید و هیچ‌گاه نتایجی کم‌تر و ضعیف‌تر از آستانه خطا و رگرسیونی که در برنامه تعریف شده است، نشان ندهد. در شکل (۶) روند اجرای کد DNN به صورت مختصر نشان داده شده است. الگوریتم ارائه شده با کنترل میزان نرون‌ها و رشد متوالی، شبکه را به طرف همگرا شدن

خطاها و داشتن رگرسیون بالا هدایت کرده و با ایجاد چند حلقه بازگشتی این عمل را انجام می‌دهد.



شکل ۶- روش شبکه عصبی توسعه یافته پیشنهادی در این تحقیق (DNN) برای تحلیل پل گلدن گیت با دقت ۸۶ درصد



شکل ۷- روش شبکه عصبی توسعه یافته پیشنهادی در این تحقیق (DNN) برای تحلیل پل گلدن گیت با دقت ۸۷ درصد

^۱ Artificial Neural Network

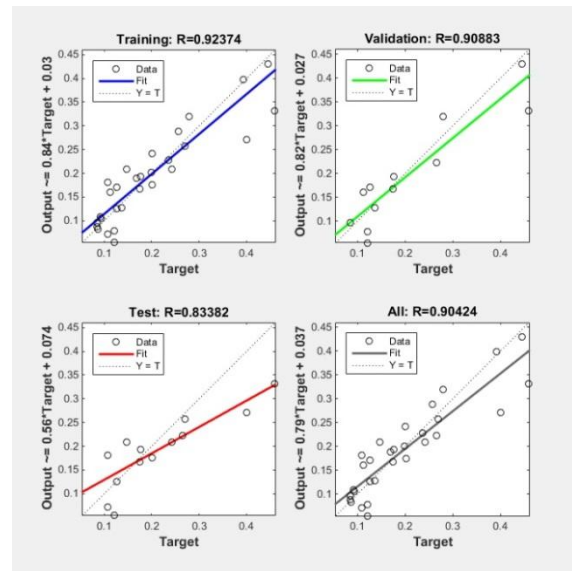
تشکیل شده با دقت بالای ۹۰ درصد می تواند خروجی ها را با دقت بالا و سرعت فوق العاده بالا پیش بینی و محاسبه نماید و بر اساس این روش می توان صدها رکورد لرزه ای مختلف را به جای تحلیل زمان بر در نرم افزاری مانند Abaqus، در محیط شبکه عصبی تشکیل شده در نرم افزار MATLAB با سرعت و دقت بالای ۹۰ درصد بررسی و خروجی های به دست آمده را تحلیل نمود.

۱۱- تکنیک DEMATEL

DEMATEL یکی از روش های تصمیم گیری بین متغیرهای زیاد با یکدیگر است؛ در این روش موضوعی به نام فاکتور تأثیر وجود دارد؛ یعنی از روش های آنالیز حساسیت یا سایر روش های مشابه، داده های کار تحقیقاتی به داده های ۰ و ۱ و ۲ و ۳ و ۴ تبدیل می شود که عدد صفر کم ترین میزان تأثیر و عدد ۴ بالاترین میزان تأثیر را دارد [۱۵]. در حقیقت روش DEMATEL میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری داده ها بر روی یکدیگر را به صورت دقیق بررسی می کند. نظریه DEMATEL یا به عبارتی تصمیم سازی بر اساس آزمون و ارزیابی آزمایشگاهی و عددی، است. این نظریه برای تجزیه و تحلیل فاکتورهای سیستم با استفاده از ابزار ماتریس و نظریه گراف است. برای استفاده از این تکنیک ابتدا باید پارامترهای تأثیرگذار بر سیستم (a_i) شناسایی و مانند رابطه (۱۴) تعریف شود:

$$a_i \in \{a_1, \dots, a_n\} \quad (14)$$

پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش شامل: نیروی پس کشیدگی کابل، سختی سازه، تغییر مکان سازه و مود اول ارتعاشی سازه هستند. پس از مشخص شدن پارامترهای مورد نظر، تأثیرگذاری یا تأثیرپذیری هر پارامتر نسبت به پارامترهای دیگر به صورت زوجی، بررسی و نسبت به میزان تأثیرگذاری پارامتر آنالیز می شوند. پارامترها به مقدار (X_{ij}) وزن دهی می شوند که (X_{ij}) مقدار تأثیرگذاری پارامتر i بر پارامتر j است. بدین صورت که برای پارامترهای بدون اثر (کاملاً اثرپذیر) مقدار عددی صفر؛ برای پارامترهایی با اثرگذاری کم، مقدار عددی یک؛ برای پارامترهایی با اثرگذاری متوسط، مقدار عددی دو؛ برای پارامترهایی با اثرگذاری زیاد، مقدار عددی سه و برای پارامترهایی با اثرگذاری بسیار زیاد (کاملاً اثرگذار) مقدار عددی چهار برای (X_{ij}) در نظر گرفته شده است. دیاگرام رابطه بین پارامترها همان طور که در شکل (۹) به صورت خلاصه نشان داده شده، رسم



شکل ۸- روش شبکه عصبی توسعه یافته پیشنهادی در این تحقیق (DNN) برای تحلیل پل گلدن گیت با دقت بالای ۹۰ درصد

در جدول (۱۱) محاسبه معیارهای ارزیابی دقیق برای روش شبکه عصبی پیشنهادی DNN دیده می شود.

جدول ۱۱- محاسبه معیارهای ارزیابی دقیق برای روش شبکه عصبی

پیشنهادی DNN					
شکل	مجموعه داده	R	MAE	RMSE	MAPE (%)
(۶)	Training	0.88648	0.029	0.041	13.8
	Validation	0.86834	0.033	0.046	15.6
	Test	0.76701	0.046	0.062	21.4
	All	0.86252	0.034	0.048	16.2
(۷)	Training	0.90144	0.027	0.038	12.7
	Validation	0.87852	0.031	0.043	14.3
	Test	0.77686	0.044	0.059	20.2
	All	0.87608	0.032	0.045	14.8
(۸)	Training	0.92374	0.023	0.033	10.9
	Validation	0.90883	0.026	0.036	12.1
	Test	0.83382	0.037	0.050	17.1
	All	0.90424	0.028	0.039	13.0

بر اساس جدول (۱۱)، مدل سوم بهترین عملکرد را دارد. R از ۰/۸۶۲۵۲ در مدل اول به ۰/۹۰۴۲۴ در مدل سوم افزایش یافته است. MAE از ۰/۰۳۴ به ۰/۰۲۸ کاهش یافته است. RMSE از ۰/۰۴۸ به ۰/۰۳۹ کاهش یافته است. MAPE از ۱۶/۲٪ به ۱۳٪ کاهش یافته است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که مدل سوم از نظر دقت پیش بینی و میزان خطا، عملکرد بهتری نسبت به دو مدل دیگر دارد. بر اساس شبکه عصبی تشکیل شده با دقت بالای ۹۰ درصد، دیگر نیازی نیست تا رکوردهای لرزه ای مجدداً بر روی سازه پل اصلی تحلیل شوند و به جای آن، شبکه عصبی

$$G = K(K - E)^{-1} \quad (19)$$

خواهد شد؛ همچنین مطابق با رابطه (۱۵) تأثیر هر پارامتر بر روی خودش صفر است.

پس از تشکیل ماتریس G، باید مجموع سطرها و ستون‌های ماتریس G، با استفاده از روابط (۲۰) و (۲۱) محاسبه شوند.

$$m_i = \sum_{j=1}^n g_{ij} \quad (i = 1.2. \dots n) \quad (20)$$

که (m_i) مجموع سطرهای ماتریس G است.

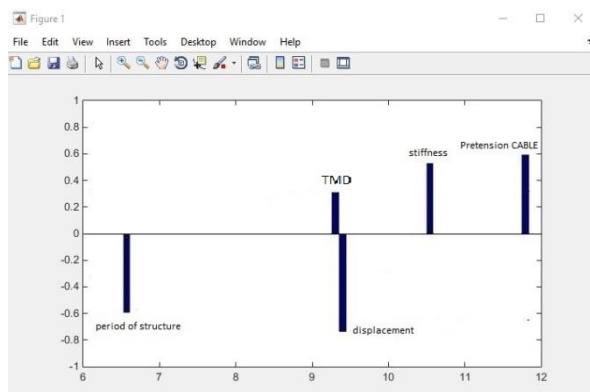
$$n_i = \left[\sum_{j=1}^n g_{ij} \right] \quad (i = 1.2. \dots n) \quad (21)$$

که (n_i) مجموع ستون‌های ماتریس G است. برای محاسبه تأثیرگذاری پارامتر نام طبق رابطه (۲۲) کافی است تا مقدار درجه تأثیرگذاری به مقدار درجه تأثیرپذیری اضافه شود. به همین شکل، برای محاسبه تأثیرپذیری پارامتر نام طبق رابطه (۲۳) کافی است تا مقدار درجه تأثیرگذاری از مقدار درجه تأثیرپذیری کسر شود.

$$P_i = m_i + n_i \quad (i = 1.2. \dots n) \quad (22)$$

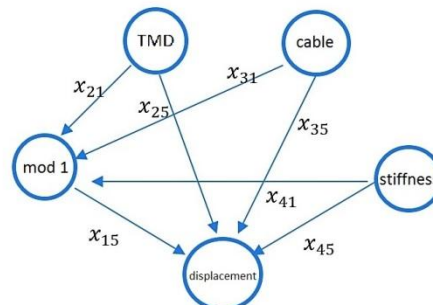
$$q_i = m_i - n_i \quad (i = 1.2. \dots n) \quad (23)$$

درنهایت، نمودار علت و معلولی، به صورت یک نمودار دوبعدی، که محور عمودی آن، پارامترهای اثرگذار و محور افقی آن پارامترهای اثرپذیر است، رسم خواهد شد. با تجزیه و تحلیل این نمودار می‌توان تصمیم مناسب را در رابطه با سیستم اتخاذ نمود.



شکل ۱۰- پارامترهای DEMATEL برای پل گلدن گیت

$$if : i = j \Rightarrow x_{ij} = 0 \quad (15)$$



شکل ۹- نمایی از دیگرام رابطه بین پارامترهای مؤثر در سیستم مورد مطالعه

با استفاده از مقادیر عددی (X_{ij}) ، ماتریس اولیه (ماتریس X) تشکیل خواهد شد. مانند رابطه (۱۶) که سطرها و ستون‌های ماتریس اولیه را مقادیر عددی (X_{ij}) تشکیل داده است.

$$X = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & \dots & a_n \\ a_1 \begin{bmatrix} 0 & x_{12} & \dots & \dots & x_{1n} \end{bmatrix} \\ a_2 \begin{bmatrix} x_{21} & 0 & \dots & \dots & x_{2n} \end{bmatrix} \\ \vdots \\ a_n \begin{bmatrix} x_{n1} & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (16)$$

سپس ماتریس نرمال‌سازی‌شده (ماتریس K) با استفاده از رابطه (۱۷) تشکیل خواهد شد.

$$K = \frac{X}{\max_i [\sum_{j=1}^n x_{ij}]} = (K_{ij})_{n \times n} \quad (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n) \quad (17)$$

پس از تشکیل ماتریس نرمال‌شده، ماتریس رابطه اصلی^۱ (ماتریس G) با استفاده از رابطه (۱۸) تشکیل خواهد شد.

$$G = K + K^2 + \dots + K^n = (G_{ij})_{n \times n} \quad (18)$$

زمانی که n به اندازه کافی بزرگ باشد، رابطه (۱۹) ارائه می‌شود (E: ماتریس واحد):

^۱Total-Relation Matrix

۱۲- نتیجه گیری

به طور متوسط توانسته است تغییر مکان های ماندگار لرزه ای را به میزان ۳۵ درصد کاهش دهد.

۶- مش بندی بهینه یکی از نکات قوت در پژوهش فوق بوده است؛ زیرا مش بندی صحیح موجب افزایش سرعت تحلیل های غیرخطی و پرهیز از خطاهای محاسباتی می شود و با مش بندی صحیح، زمان تحلیل به میزان ۶۰ درصد کاهش می یابد.

۱۳- ملاحظات طراحی و کاربرد عملی

تمامی پارامترهای TMD (جرم، سختی، میرایی) به صورت بهینه انتخاب شده اند.

اجرای TMD در پل گلدن گیت یکی از سریع ترین راه های بهبود رفتار لرزه ای سازه در برابر زلزله های حوزه دور از گسل است ولی سایر روش های مقاوم سازی بسیار هزینه ر هستند.

۱۴- پیشنهاد برای تحقیقات آینده

- ۱- بررسی اثر باد و زلزله به صورت هم زمان
- ۲- تحلیل اندرکنش خاک و سازه

در این پژوهش به ارزیابی رفتار لرزه ای پل معلق مجهز به میراگر جرمی تحت رکوردهای لرزه ای حوزه دور از گسل با استفاده از روش DEMATEL (مطالعه موردی: پل گلدن گیت) پرداخته شده است؛ لازم به ذکر است مدل سازی مدل های سه بعدی پیشرفته جزء دشوارترین کارهای تحلیل و مدل سازی بوده و لذا زمان تحلیل طولانی نیز یکی دیگر از محدودیت های پژوهش است. به همین دلیل ایده استفاده از شبکه عصبی یا روش DEMATEL برای تحلیل نتایج، ضروری است. نتایج پژوهش به شرح ذیل است:

- ۱- اثر هندسه غیرخطی (NLGEOM) موجب افزایش دقت نتایج شد و نتایج بدون استفاده از اثرات هندسه غیرخطی به دلیل وجود کابل، قابل استناد نیست به همین علت در تمامی مراحل تحلیل از هندسه غیرخطی NLGEOM استفاده شده است.
- ۲- بر اساس شبکه عصبی تشکیل شده با دقت بالای ۹۰ درصد، دیگر نیازی نیست تا رکوردهای لرزه ای مجدداً بر روی سازه پل اصلی تحلیل شوند و به جای آن، این شبکه عصبی می تواند خروجی ها را با دقت بالا و سرعت فوق العاده بالا پیش بینی و محاسبه نماید و بر اساس این روش می توان صدها رکورد لرزه ای مختلف را به جای تحلیل زمان بر در نرم افزاری مانند Abaqus، در محیط شبکه عصبی تشکیل شده در نرم افزار MATLAB با سرعت و دقت بالای ۹۰ درصد بررسی و خروجی های به دست آمده را تحلیل نمود.
- ۳- نتایج نشان می دهد که رفتار پل های معلق به شدت وابسته به اندرکنش میان کابل ها و عرشه است. حذف اثرات غیرخطی هندسی، موجب کاهش محسوس دقت تحلیل خواهد شد. همچنین تحلیل مودال، بیانگر آن است که مودهای پایین سهم غالبی در پاسخ لرزه ای دارند. مقایسه نتایج با مطالعات منتشر شده نشان می دهد اختلاف فرکانس های طبیعی، کم تر از ۵ درصد بوده که بیانگر اعتبار مناسب مدل اجزای محدود است.

- ۴- با استفاده از روش شبکه عصبی پیشنهادی با دقت بالای ۹۰ درصد و استفاده از روش DEMATEL، مشخص شده است که تغییر مکان و مود ارتعاشی سازه تأثیرپذیرترین پارامتر و سختی پایه ها، کابل ها و رفتار میراگر جرمی تأثیرگذارترین پارامترها بوده اند.

- ۵- بیش ترین تغییر مکان در مرکز دهانه ایجاد می شود؛ به همین علت میراگر جرمی در این محدوده قرار گرفته است و نتایج تحلیل های لرزه ای نشان می دهد که استفاده از میراگر جرمی

- [13] Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) (2026) PEER Ground Motion Database. University of California, Berkeley. Available at: PEER Ground Motion Database.
- [14] Standard 2800 (2015), "Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (4th edition)", Road, Housing and Urban Development Research Center. (in Persian)
- [15] Guo, W., Deng, Q., and Pan, X.D. (2013), "Risk Evaluation of Highway Tunnel Construction Based on DEMATEL Method", *Applied Mechanics & Materials*, 368–370, pp.1472–1476.
- [1] Takin, K., Doroudi, R., and Doroudi, S. (2021), "Vibration Control of Structure by Optimising the Placement of Semi-Active Dampers and Fuzzy Logic Controllers" *Australian Journal of Structural Engineering*, 22(3), pp.222-235.
- [2] Astaneh-Asl, A. (2017), "Preservation of Historical Bridges in USA: the Golden Gate Bridge and the Albion River Bridge Cases", *Preservation*, 12, pp.15.
- [3] Nakamura, Y., Der Kiureghian, A., and Liu, D. (1993), "Multiple Support Response Spectrum Analysis of the Golden Gate Bridge" Report No. UBC/EERC-93/05. Berkeley, CA: Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California at Berkeley.
- [4] Castro, J.P. (2026), "Risk Management in Uncharted Territory: Lessons from the Golden Gate Bridge for the AI Era", *ResearchGate*.
- [5] Ghafari, R., and Faraji, F. (2025), "Integrating Smart Polymers, Digital Twins, and AI for Corrosion Mitigation and Structural Health Monitoring in Large-Scale Infrastructure: A Case Study on the Golden Gate Bridge", In *Proceedings of the International Conference on Urban Planning, Architecture, Civil Engineering & Environment*, Wolfsburg, Germany, 6.
- [6] Chen, J.T., Kao, H.C., Lee, J.W., and Lee, Y.T. (2026), "Analytical Solutions and FEM Results for the Vibration Response of a Cantilever Beam with Two End Springs Subjected to the Support Motion", *International Journal of Structural Stability & Dynamics*, pp.2750385.
- [7] Game, T., Vos, C., Morshedi, R., Gratton, R., Alonso-Marroquin, F., and Tahmasebinia, F. (2016), "Full Dynamic Model of Golden Gate Bridge", In *AIP Conference Proceedings*, 1762(1), pp.020005.
- [8] Jiménez-Alonso, J.F., Suzana, E., Duvnjak, I., and de Sá Caetano, E. (2025), "Evolutionary Game Theory-Based Finite Element Model Updating of a Moveable Cable-Stayed Footbridge", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 15(2), pp.355–370.
- [9] Neupane, S., and Pantelides, C.P. (2026), "Finite-Element Modeling of a Post-Tensioned Bridge Bent with Tension-Only Replaceable Anchors", *Journal of Bridge Engineering*, 31(2), pp.04025106.
- [10] AASHTO. (2020), *LRFD Bridge Design Specifications* (9th ed.). American Association of State Highway & Transportation Officials.
- [11] Yan, Y., and Hajjar, J.F. (2024), "A Parametric Approach for Creating Finite Element Models from Point Clouds for Steel Superstructure Components in Steel Girder Bridges", *Structure & Infrastructure Engineering*.
- [12] Zounemat-Kermani, M., Kisi, O., and Rajaei, T. (2013), "Performance of Radial Basis and LM-Feed Forward Artificial Neural Networks for Predicting Daily Watershed Runoff", *Applied Soft Computing*, 13(12), pp.4633–4644.