



University Of Qom



Mechanical Behavior of a Cylindrical Chlorobutyl-Based Viscoelastic Damper: An Experimental Study

Sanam Ansarighadim¹, Alireza Manafpour²

1. Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran. E-mail: s.ansari@urmia.ac.ir
2. Corresponding author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran. E-mail: a.manafpour@urmia.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 18 Jun 2025
Revised 22 Nov 2025
Accepted 02 Dec 2025
Published 04 Dec 2025

Keywords:
Cylindrical Damper,
Viscoelastic Material,
Cyclic Loading,
Chlorobutyl Rubber.

ABSTRACT

In recent decades, viscoelastic dampers have attracted the attention of many researchers due to their reasonable cost, ease of construction, and high energy dissipation capacity. The mechanical characteristics of these dampers are directly influenced by the properties of the polymeric materials used in their fabrication. Such materials are sensitive to displacement amplitude, loading frequency, temperature, and geometry, making the process of finding a suitable viscoelastic composition for damper design both complex and time-consuming. In this study, small-scale planar dampers were first constructed to compare two polymeric compositions: one based on natural rubber and the other on chlorobutyl rubber. The results of cyclic loading tests showed that the viscoelastic damper made with chlorobutyl polymer exhibited significantly better damping performance than the one made with natural rubber. Based on these findings, full scale cylindrical dampers were fabricated using the chlorobutyl based composition and tested under cyclic loading with a hydraulic jack. The goal was to investigate the effects of loading rate, thickness of the viscoelastic layer, and applied strain. The results indicated that increasing the loading rate and strain led to greater energy dissipation and load bearing capacity. Additionally, while reducing the viscoelastic layer thickness had little impact on damping, it did enhance the load bearing capacity.

Cite this article: Ansarighadim S, Manafpour A. Mechanical Behavior of a Cylindrical Chlorobutyl-Based Viscoelastic Damper: An Experimental Study. Civil Infrastructure Researches. 2025; 11(2): 185-200. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.13211.1632>



Introduction

Recent earthquakes and the associated damage and losses show that traditional design methods do not fully meet societal expectations. Consequently, new seismic design paradigms have emerged, among them the damage avoidance philosophy. The primary objective of this approach is to reduce or eliminate earthquake induced damage by employing devices and systems other than the primary structural components.

Among cost effective and accessible options, viscoelastic dampers have attracted considerable attention in recent years. Their inherently nonlinear behavior and the diversity of materials used in their construction, however, make their application technically demanding. Studies indicate that these dampers can increase equivalent damping by approximately 15 to 57%, and, depending on the design and polymer formulation, can provide varying levels of stiffness.

Problem Statement

To gain a comprehensive understanding of the behavior of viscoelastic dampers, a range of experiments is required to examine the effects of polymer composition, damper geometry, loading rate, and displacement amplitude. This study was initiated with the aim of developing a viscoelastic damper with appropriate damping and stiffness using readily available materials. The goal is to identify a polymer composition that can be used as a structural viscoelastic damper. To achieve this, several small scale viscoelastic dampers with different polymer compositions were fabricated and subjected to experimental evaluation. A chlorobutyl based polymer was selected as the base material for investigating other mechanical properties of cylindrical viscoelastic dampers at full scale.

Results

To investigate the influence of various conditions on the hysteresis behavior and dynamic characteristics of cylindrical viscoelastic dampers, a loading setup was designed around a 1000 kN hydraulic jack. This setup is versatile and can be used for different dampers and loading conditions. To examine

the effects of displacement amplitude and loading rate on hysteresis behavior, a cylindrical viscoelastic damper with dimensions 8×20 cm was fabricated and tested. Additionally, to assess the effect of the viscoelastic material thickness on the hysteresis curve and its dynamic characteristics, two similar dampers with identical overall dimensions but different viscoelastic material thicknesses were fabricated and subjected to experimental investigation.

Conclusion

The results from the hysteresis curves for the small scale fabricated dampers showed that chlorobutyl based materials had a load capacity of 3 kN at a displacement of 13 mm, whereas the corresponding value for natural rubber was 2 kN. At the same displacement, chlorobutyl based polymers dissipated more energy than natural rubber, with energy dissipation approximately twice as high.

Furthermore, for the full scale cylindrical dampers fabricated with a chlorobutyl based polymer, the load capacity at a loading rate of 60 mm per minute and a displacement of 16 mm was approximately 20 kN, whereas at a loading rate of 20 mm per minute it decreased to 10 kN. In addition to the increase in load capacity at the higher loading rate, attributed to the increased stiffness of the viscoelastic material, the damping also nearly doubled.

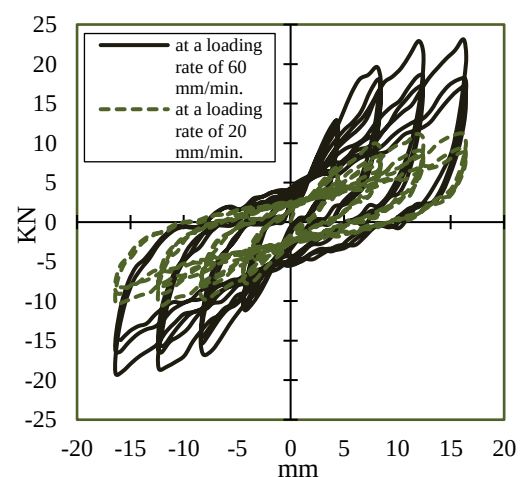


Fig. 1. Hysteresis curves of a viscoelastic damper at various loading rates

At the same loading rate, the load capacity at 200 percent strain was slightly higher for the

damper with 5 mm thickness compared with 8 mm thickness. Specifically, the 5 mm thick damper at 10 mm displacement had a load capacity higher than the 8 mm thick damper at 16 mm displacement. This behavior was primarily attributed to hardening of the viscoelastic material at smaller thicknesses. Moreover, changing the thickness had little effect on system damping, likely because the effects of material volume and shear strain offset each other. Overall, the findings indicate that cylindrical viscoelastic dampers, despite using a relatively small volume of viscoelastic material, possess high energy dissipation capacity.

Chlorobutyl based materials not only deliver substantial damping performance but also exhibit stable behavior at high strain levels. A direct relationship was also observed between increasing displacement amplitude and both damping and load capacity.

Funding Statement

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

Declaration of Competing Interest

■ **No competing interests:** 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.

Authors' Contributions

Sanam Ansari Ghadyem:

Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Investigation; Methodology; Project administration; Design; Fabrication; Experimental testing; Validation; Roles/Writing – original draft; Writing – review & editing.

Alireza Manafpour:

Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Investigation; Methodology; Project administration; Design; Supervision; Validation; Resources; Roles/ Writing – review & editing.

بررسی تجربی رفتار مکانیکی میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای بر پایه پلیمر کلروبتیل

صنم انصاری قدیم^۱، علیرضا مناف‌پور^۲✉

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: s.ansari@urmia.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: a.manafpour@urmia.ac.ir

چکیده

در دهه‌های اخیر، میراگرهای ویسکوالاستیک به دلیل هزینه مناسب، سهولت ساخت و قابلیت اتلاف انرژی بالا، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند. مشخصات مکانیکی این میراگرها به طور مستقیم تحت تأثیر خواص مواد پلیمری به کار رفته در ساخت آن‌هاست. این مواد از تنوع ساختاری بالایی برخوردارند و نسبت به دامنه جابه‌جایی، فرکانس بارگذاری، دما و شکل هندسی حساس‌اند. بنابراین، یافتن ترکیب مناسب ماده ویسکوالاستیک برای ساخت میراگری با عملکرد مطلوب، فرایندی پیچیده و زمان‌بر است. در این پژوهش، ابتدا با ساخت میراگرهای صفحه‌ای در ابعاد کوچک، دو نوع ترکیب پلیمری بر پایه لاستیک طبیعی و لاستیک کلروبتیل مقایسه شد. نتایج بارگذاری سیکلی نشان داد که میراگر ساخته‌شده با پلیمر کلروبتیل، عملکرد میرایی به مراتب بهتری نسبت به نمونه ساخته‌شده با لاستیک طبیعی دارد. بر همین اساس، میراگرهای استوانه‌ای در مقیاس واقعی با استفاده از ترکیب پلیمری کلروبتیل ساخته شدند و تحت بارگذاری سیکلی با جک هیدرولیکی آزمایش شدند. هدف بررسی تأثیر عواملی نظیر نرخ بارگذاری، ضخامت لایه ویسکوالاستیک و کرنش‌های مختلف بر رفتار مکانیکی این میراگرها بود. نتایج نشان داد که افزایش نرخ بارگذاری و کرنش منجر به افزایش میرایی و ظرفیت باربری می‌شود. همچنین، کاهش ضخامت لایه ویسکوالاستیک، با وجود تأثیر اندک بر میرایی، باعث افزایش ظرفیت باربری شد. میراگرهای ساخته‌شده، حتی در کرنش‌های بالا، در برابر بارگذاری سیکلی بدون وقوع شکست مکانیکی مقاومت کردند و اتلاف انرژی قابل توجهی نشان دادند.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۱۳

کلیدواژه‌ها:

میراگر استوانه‌ای،
ماده ویسکوالاستیک،
بارگذاری چرخه‌ای،
لاستیک کلروبتیل.

استناد: انصاری قدیم، صنم، مناف‌پور علیرضا. بررسی تجربی رفتار مکانیکی میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای بر پایه پلیمر کلروبتیل. پژوهش‌های

زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۴؛ ۱۱(۲): ۱۸۵-۲۰۰. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.13211.1632>

۱- مقدمه

تا دهه‌های اخیر، تمرکز اغلب آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای تنها بر حفظ جان انسان‌ها در برابر زلزله‌های شدید بوده‌است. تغییر شکل‌های پسماند و آسیب‌های تجمعی، از جمله پیامدهای رایج زلزله‌های شدید در سازه‌هایی‌اند که بر اساس فلسفه‌ی متداول طراحی لرزه‌ای ساخته شده‌اند [۱ و ۲]. هدف اصلی این فلسفه، طراحی و اجرای سازه‌هایی بوده‌است که از یک‌سو مقرون‌به‌صرفه باشند و از سوی دیگر بتوانند به‌طور مؤثر از جان ساکنان در برابر زلزله‌های شدید محافظت کنند [۳]. مطالعات جدید نشان می‌دهند که سازه‌هایی که بر اساس طیف طرح هم‌خطر طراحی می‌شوند، لزوماً در تمامی مناطق ایمن و اقتصادی نیستند [۴].

یافته‌های حاصل از زمین‌لرزه‌های دهه‌های اخیر نشان می‌دهد که بخش قابل‌توجهی از آسیب‌های وارده به سازه‌ها عملاً غیرقابل‌تعمیر بوده و در مواردی که تغییر مکان نسبی طبقات از ۰/۵ درصد فراتر رود، هزینه‌ی نوسازی کمتر از هزینه‌ی تعمیر خواهد بود [۵ و ۶]. مطالعه‌ای که به‌منظور شناسایی نقاط ضعف لرزه‌ای پایه‌های یک پل بزرگراهی در شهر تهران انجام شد، نشان داد که برخی از پایه‌ها دارای شاخص خرابی ۱۰۰ درصد هستند [۷].

پیشرفت‌های حاصل‌شده در علوم مختلف طی سال‌های اخیر موجب شده است که آسیب‌های سازه‌ای، حتی در زلزله‌های شدید، دیگر به‌سادگی از سوی جوامع قابل‌پذیرش نباشند [۸]. عملکرد لرزه‌ای نامناسب سازه‌ها در مناطق غیرشهری، مانند بنادر، می‌تواند علاوه بر مشکلات معمول، مشکلات عمده‌ای در زنجیره تأمین کالا و فعالیت‌های تجاری ایجاد کند [۹].

برای تحقق اهداف فلسفه رایج طراحی لرزه‌ای، برخی اعضای اصلی سازه به‌عنوان اعضای فداشونده در نظر گرفته می‌شوند. در این رویکرد، هدف اصلی جلوگیری از بروز آسیب نیست، بلکه کنترل و مدیریت آسیب‌ها به‌گونه‌ای مدنظر قرار می‌گیرد که از فروپاشی کلی سازه جلوگیری

شود. در مقابل، فلسفه «طراحی اجتناب از آسیب» به‌عنوان یکی از دیدگاه‌های نوین در طراحی لرزه‌ای مطرح شده است که در آن، اصل بر حذف عناصر فدایی از میان اعضای اصلی سازه است [۱۰]. تحقق این هدف، مستلزم استفاده از سامانه‌ها و تجهیزات جایگزینی است که بتوانند با افزایش میرایی، پاسخ لرزه‌ای سازه را کاهش دهند.

در این میان، میراگرها به‌عنوان یکی از مؤثرترین ابزارهای کنترل سازه‌ای، نقش مهمی در کاهش آسیب‌های ناشی از زمین‌لرزه ایفا می‌کنند. اعضای محوری و محل اتصال بین سازه و پی، از جمله رایج‌ترین مکان‌های نصب تجهیزات اتلاف انرژی نظیر میراگرها به‌شمار می‌روند [۱۱]. میراگرها، سیستم‌های کنترل سازه‌ای هستند که با اتلاف انرژی موجب افزایش میرایی سازه می‌شوند و از عمل‌کردن اعضای اصلی سازه به‌عنوان فیوز جلوگیری می‌کنند [۱۲]. میراگرها بسته به اینکه برای ایفای نقش خود در سازه نیاز به نیروی خارجی دارند یا خیر، به چهار دسته فعال، غیرفعال، نیمه‌فعال و ترکیبی تقسیم می‌شوند [۱۳-۱۵]. مطابق با مستند فیما ۲۷۴، میراگرهای غیرفعال به دو دسته وابسته به جابه‌جایی و وابسته به سرعت تقسیم می‌گردند. میراگرهای غیرفعال، به‌دلیل هزینه کمتر و بی‌نیازی از منبع تغذیه خارجی، در مقایسه با سایر انواع، از مزیت‌های بیشتری برخوردارند [۱۶].

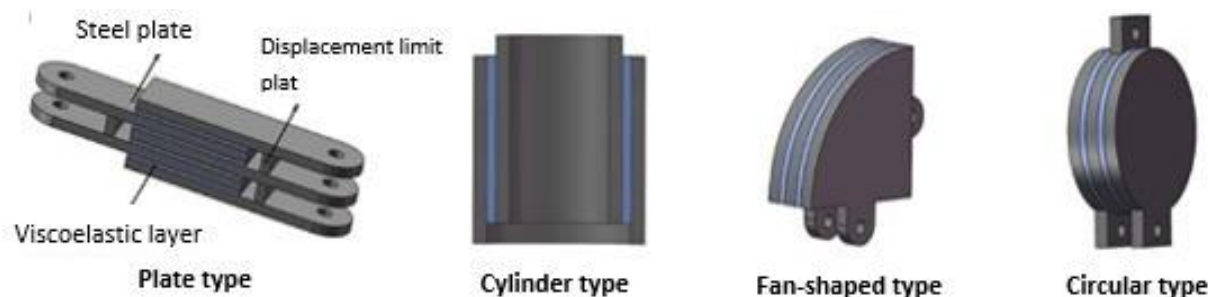
تفاوت اصلی بین میراگرهای وابسته به سرعت و میراگرهای وابسته به جابه‌جایی در بازه ارتعاشاتی است که می‌توانند آن‌ها را مستهلک کنند. میراگرهای وابسته به جابه‌جایی در برابر ارتعاشاتی با دامنه جابه‌جایی زیاد مانند زلزله کاربرد دارند، در حالی که میراگرهای وابسته به سرعت می‌توانند هم در برابر ارتعاشات کم‌دامنه مانند باد و هم ارتعاشات شدید مانند زلزله استفاده شوند [۱۷]. مهم‌ترین انواع میراگرهای وابسته به سرعت شامل میراگرهای ویسکوز و ویسکوالاستیک هستند.

میراگرهای ویسکوالاستیک، نوعی از میراگرهای غیرفعال هستند که به هر دو پارامتر سرعت و جابه‌جایی حساس‌اند؛ از این‌رو، می‌توان از آن‌ها برای مقابله با

نمی‌شود، بلکه به ابعاد و هندسه میراگر نیز وابسته است [۲۴-۲۶].

هزینه پایین، عملکرد مطلوب، و سهولت در طراحی و ساخت، میراگرهای ویسکوالاستیک را به یکی از پرکاربردترین و محبوب‌ترین انواع میراگرها در سال‌های اخیر تبدیل کرده‌است [۲۷ و ۲۸].

میراگرهای ویسکوالاستیک از ترکیب مواد پلیمری ساخته شده‌اند که میان دو صفحه صلب، نظیر صفحات فولادی، قرار می‌گیرند. با ایجاد اختلاف جابه‌جایی میان این صفحات، ماده پلیمری تحت سه نوع کرنش برشی شامل برش فشاری، برش جانبی محوری و برش چرخشی قرار گرفته و از این طریق، انرژی دینامیکی را مستهلک می‌نماید. شکل ۱ انواع مختلف میراگرهای ویسکوالاستیک را نشان می‌دهد. میراگرهای ویسکوالاستیک به‌منظور بهبود پاسخ چرخه‌ای سیستم، در انواع متعددی از جمله انواع صفحه‌ای، استوانه‌ای، شعاعی و همچنین در فرم‌های ترکیبی و نوآورانه ساخته می‌شوند.



شکل ۱- انواع مختلف میراگرهای ویسکوالاستیک [۱۲]

یکنواختی بیشتر در خواص، پایداری بهتر در برابر شرایط محیطی و امکان بهینه‌سازی فرمولاسیون، عملکرد مکانیکی مطلوب‌تری ارائه می‌دهند.

برای آن‌که ماده اولیه الاستومری به خواص لازم، از جمله کشسانی، پایداری و دوام برسد، فرایند ولکانش با گوگرد به کار گرفته می‌شود. این فرایند با ایجاد پیوندهای عرضی بین زنجیره‌های پلیمری، مقاومت حرارتی و مکانیکی ماده را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد [۲۹ و ۳۰]. علاوه بر آن، برای بهبود ویژگی‌هایی مانند استحکام کششی و

ارتعاشات ناشی از زلزله و باد استفاده کرد [۱۸]. کاربرد میراگرهای ویسکوالاستیک نخستین بار در دهه ۱۹۶۰ در صنایع مکانیک و هوافضا مطرح شد و سپس به حوزه‌هایی مانند مهندسی عمران گسترش یافت. تاکنون بیش از ۴۰۰۰۰ میراگر ویسکوالاستیک در بیش از ۲۵۰ پروژه برای مقابله با ارتعاشات ناشی از شرایط شدید بادی و لرزه‌ای نصب شده‌اند [۱۹ و ۲۰].

میراگرهای ویسکوالاستیک، از طریق کنترل سازه‌ای، امکان طراحی یکپارچه و اجرای ساختمان‌هایی با فرم‌های خلاقانه‌تر نظیر سازه‌های باریک و بلند را مهیا می‌سازند [۲۱]. این نوع میراگرها می‌توانند نسبت میرایی سیستم را بین دو درصد تا ۲۵ درصد افزایش دهند [۲۲]. میراگرهای ویسکوالاستیک، علاوه بر افزایش میرایی، موجب افزایش سختی سیستم نیز می‌شوند [۲۳].

بررسی‌های آزمایشگاهی نشان داده‌اند که خواص مکانیکی میراگرهای ویسکوالاستیک تنها به نوع الاستومر و ترکیبات استفاده‌شده در تولید ماده ویسکوالاستیک محدود

تأثیر عملکرد میراگرهای ویسکوالاستیک بر رفتار سازه‌ای و مطالعه ترکیبات پلیمری مختلف برای تعیین و بهینه‌سازی خواص مکانیکی میراگرها، دو محور اصلی پژوهش در این حوزه هستند. در ادامه، مطالعات پیشین انجام‌شده در این دو محور مرور می‌شود تا چارچوبی جامع از پیشنهاد تحقیق در زمینه میراگرهای ویسکوالاستیک ارائه شود. در ساخت مواد ویسکوالاستیک، رایج‌ترین پایه‌های پلیمری لاستیک طبیعی و لاستیک‌های مصنوعی هستند. در مقایسه با نوع طبیعی، لاستیک‌های مصنوعی به‌دلیل

افزایش میرایی داخلی از پرکننده‌هایی مانند دوده (کربن بلک) یا ذرات رسی استفاده می‌شود. این مواد کمک می‌کنند تا ساختار داخلی ماده پایدارتر شده، انرژی بیشتری جذب شود و عملکرد کلی ماده در برابر تغییر شکل‌های ناشی از بارهای لرزه‌ای بهبود یابد [۳۱].

مطالعات متعددی به بررسی ترکیبات پلیمری مختلف در ساخت میراگرهای ویسکوالاستیک پرداخته‌اند که در ادامه خلاصه‌ای از آن‌ها می‌آید. شو^۱ و همکاران پنج نوع لاستیک شامل پروپیلن، استایرن، دی‌ان، سیلیکون و آکریلات را مقایسه کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش فرکانس بارگذاری، میزان میرایی مواد به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، در حالی که کاهش دما منجر به بهبود خواص مکانیکی مواد ویسکوالاستیک می‌شود. همچنین نتایج پژوهش آن‌ها حاکی از آن بود که ترکیبات آکریلات و پروپیلن نسبت به سایر لاستیک‌ها از میرایی بالاتری برخوردار بوده و حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات دما و فرکانس از خود نشان می‌دهند [۹].

در راستای تکمیل این تحقیقات، هوجر^۲ و همکاران مجموعه‌ای از لاستیک‌ها، از جمله یورتان، ایزوبوتیلن، ایزوپرن و پلی‌اتیلن، را از نظر میرایی مؤثر بررسی کردند و دریافتند که پلی‌اتیلن و لاستیک بوتیل در مقایسه با دیگر ترکیبات عملکرد میرایی بهتری از خود نشان می‌دهند [۳۲]. خیا^۳ و همکاران با بررسی ترکیب بوتیل با پلی‌ایزوبوتیلن دریافتند که این ترکیب منجر به بهبود ظرفیت اتلاف انرژی می‌شود [۳۳]. همچنین، چوپس^۴ و همکاران تأثیر نسبت دوده (کربن بلک) را در بهبود خواص ویسکوالاستیک ترکیباتی مانند نیتریل بوتادین و کلرو بوتیل بررسی کردند و نشان دادند که افزایش نسبت پرکننده‌ها می‌تواند سختی و میرایی ماده را بهبود بخشد [۳۴]. در پژوهشی دیگر، طبری و همکاران ترکیبی نوین برای ارتقای خواص میرایی لاستیک کلرو بوتیل معرفی کردند که نسبت

به ترکیبات مرسوم، عملکردی به مراتب بهتر نشان داد [۳۵].

جی^۵ و همکاران، با بررسی میراگرهای ویسکوالاستیک استوانه‌ای، توانایی بالای این میراگرها را در اتلاف انرژی در بازه وسیعی از فرکانس‌ها اثبات کردند. براساس نتایج آن‌ها، بیشینه ضریب اتلاف انرژی می‌تواند تا عدد قابل توجه ۰/۵۷ افزایش یابد [۳۶]. زو^۶ و همکاران، میراگر صفحه‌ای را با استفاده از ماده ویسکوالاستیک تقویت‌شده با ایزوپرن مصنوعی آزمایش کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش فرکانس به بیش از ۰/۵ هرتز، ظرفیت میرایی به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و عملکرد این میراگر در محدوده ۱۵ تا ۴۳ درصد میرایی تحت شرایط مختلف فرکانسی قابل دستیابی است [۳۷].

به‌منظور ارتقای عملکرد میراگرهای ویسکوالاستیک، ترکیب آن‌ها با مواد کمکی نظیر سرب، فولاد و آلیاژهای حافظه‌دار نیز پیشنهاد شده است. پژوهشگران، تأثیر ترکیب میراگرهای ویسکوالاستیک با این مواد را بررسی کردند و بهبود معناداری در بهره‌وری و ظرفیت اتلاف انرژی این سیستم‌ها گزارش دادند [۳۸-۴۱].

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به بررسی نقش میراگرهای ویسکوالاستیک در بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها پرداخته‌اند. شون^۷ و همکاران قاب بتن‌آرمه‌ای را تحت بارگذاری لرزه‌ای قرار دادند و رفتار آن را در دو حالت با استفاده از میراگر ویسکوالاستیک و بدون آن مقایسه کردند. نتایج نشان داد که استفاده از این نوع میراگرها به‌طور قابل توجهی موجب کاهش آسیب در اعضای سازه‌ای می‌شود و در افزایش ایمنی کلی سازه نقش مؤثری دارد [۴۲].

در مطالعه‌ای مشابه، تسای^۸، عملکرد میراگرهای ویسکوالاستیک را در شرایطی که سازه به‌طور هم‌زمان تحت بارهای افقی و عمودی ناشی از زلزله قرار می‌گیرد بررسی

⁵Ge⁶ Zhou⁷ Shen⁸ Tsai¹ Shu² Hujare³ Xia⁴ Capps

نوآوری پژوهش حاضر، ارزیابی تجربی میراگرهای ویسکوالاستیک استوانه‌ای در مقیاس واقعی، بر پایه پلیمر کلرو بوتیل و تحلیل هم‌زمان اثر سه متغیر نرخ بارگذاری، ضخامت لایه ویسکوالاستیک و مقدار کرنش بر رفتار هیستریزیس این میراگرها است؛ موضوعی که در ادبیات پژوهش پیشین کمتر به آن پرداخته شده است.

۲- میراگرهای ویسکوالاستیک

مواد لاستیکی به‌عنوان یکی از زیرمجموعه‌های پلیمرهای با میرایی بالا شناخته می‌شوند که هم‌زمان دو رفتار مکانیکی مهم، یعنی خاصیت فوق‌کشسانی و ویسکوالاستیسیته را دارا می‌باشند [۴۵]. این مواد در مواجهه با بارگذاری‌های دینامیکی مانند زلزله، به‌گونه‌ای رفتار می‌کنند که کرنش، به‌دلیل ماهیت ویسکوالاستیک، نسبت به تغییرات تنش دارای تأخیر زمانی است. این اختلاف فاز میان تنش و کرنش، منجر به اتلاف انرژی می‌شود که در قالب رفتار میرایی ظاهر می‌گردد.

عملکرد میرایی مواد لاستیکی به‌طور معمول، با استفاده از ضریب اتلاف میرایی، توصیف می‌گردد. هرچه مقدار این ضریب بزرگ‌تر باشد، میزان انرژی مستهلک‌شده توسط ماده نیز بیشتر خواهد بود. این ضریب، نسبت بین مدول برشی سخت و مدول برشی نرم است که به ترتیب، نشان‌دهنده میزان انرژی مستهلک‌شده و انرژی الاستیک ذخیره‌شده در ماده هستند [۴۶]. در طراحی سیستم‌های کنترل لرزه‌ای، مانند میراگرهای ویسکوالاستیک، ظرفیت مستهلک سازی انرژی، اهمیت بسزایی دارد.

نمودارهای هیستریزیس مواد ویسکوالاستیک معمولاً در قالب منحنی‌هایی با شکل بیضوی ترسیم می‌شود. مساحت محصورشده در این منحنی‌ها بیانگر میزان انرژی مستهلک‌شده در هر چرخه بارگذاری است. بنابراین، هرچه این مساحت بزرگ‌تر باشد، دلالت بر افزایش ظرفیت میرایی ماده دارد. شکل ۲ نمودار هیستریزیس معمول مواد ویسکوالاستیک را نشان می‌دهد.

کردند. آن‌ها دریافتند که عواملی همچون دما، فرکانس و میزان جابه‌جایی تأثیر مستقیمی بر رفتار میراگرهای ویسکوالاستیک دارند. آزمایش‌ها نشان داد که تغییر در هریک از این پارامترها می‌تواند به تفاوت قابل‌توجهی در عملکرد میراگر منجر شود [۴۳].

محققان، با استفاده از مدل‌سازی عددی، تأثیر میراگرهای ویسکوالاستیک را در یک سازه واقعی بررسی کردند. آن‌ها یک هتل چندطبقه را در دو حالت با و بدون میراگر مدل‌سازی کردند و نشان دادند که حضور این میراگرها می‌تواند پاسخ لرزه‌ای سازه را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد. افزون بر این، یک مدل تحلیلی ارائه دادند که رفتار وابسته به دما و فرکانس این نوع میراگرها را شبیه‌سازی می‌کند و بدین ترتیب امکان طراحی دقیق‌تر آن‌ها را فراهم می‌سازد [۴۴].

در راستای بررسی عملکرد میراگرهای ویسکوالاستیک بر پایه پلیمرهای مختلف، این پژوهش به مطالعه و مقایسه دو ترکیب پلیمری، لاستیک طبیعی و کلرو بوتیل پرداخته است. به‌منظور ارزیابی اولیه، دو نمونه میراگر صفحه‌ای کوچک ساخته شدند و تحت بارگذاری چرخه‌ای با دستگاه یونیورسال آزمایش شدند. ترکیب مؤثرتر، براساس نتایج آزمون‌ها، انتخاب شد و با استفاده از آن، میراگر استوانه‌ای در مقیاس واقعی با ابعاد 20×8 سانتی‌متر ساخته شد. نتایج آزمون‌های چرخه‌ای با دامنه‌های گوناگون جابه‌جایی، حاکی از عملکرد مناسب این میراگر در اتلاف انرژی و ظرفیت باربری بود.

در گام بعد، به‌منظور بررسی تأثیر عوامل مختلف بر رفتار هیستریزسی میراگر، دو نمونه میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای با ابعاد یکسان و ضخامت‌های متفاوت لایه ویسکوالاستیک ساخته شدند و تحت بارگذاری چرخه‌ای با فرکانس‌ها و دامنه‌های جابه‌جایی متفاوت آزمایش شدند. این آزمون‌ها با هدف تحلیل تأثیر فرکانس بارگذاری، دامنه جابه‌جایی و ضخامت ماده ویسکوالاستیک بر پاسخ هیستریزسی سیستم انجام شدند.

$$V = n_v A_v t \quad (۳)$$

$$\gamma_0 = \frac{u_0}{t} \quad (۴)$$

در معادله (۳)، A_v نمایانگر مساحت ماده ویسکوالاستیک است که تحت کرنش برشی قرار می‌گیرد. تعداد لایه‌های مواد ویسکوالاستیک با n_v ، ضخامت ماده با t و حداکثر میزان جابه‌جایی با u_0 نشان داده می‌شود. مواد ویسکوالاستیک، موادی مرکب هستند که ماتریس پلیمری نقش اصلی را در تعیین خواص میرایی آن‌ها ایفا می‌نماید. با این حال، سایر اجزای تشکیل‌دهنده، مانند سامانه ولکانش، سامانه پرکننده و سامانه ضدپیری نیز تأثیر مستقیمی بر سایر ویژگی‌های این مواد دارند [۲۹].

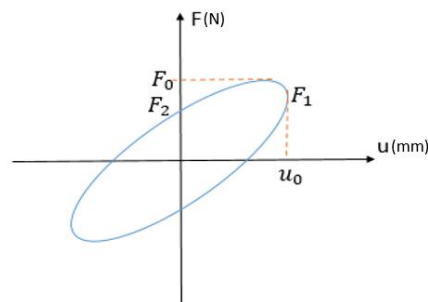
بنابراین، نمودارهای هیستریزس ترکیبات مختلف مواد پلیمری، می‌توانند اشکال متفاوتی داشته باشند؛ همان‌طور که این مواد، رفتارهای متفاوتی از یکدیگر نشان می‌دهند. برای مثال، آکریلات نسبت به تغییرات فرکانس بارگذاری، حساسیت بالایی دارد؛ در حالی که سیلیکون واکنش کمتری به این تغییرات نشان می‌دهد. از سوی دیگر، میزان میرایی ایجادشده توسط آکریلات، به‌مراتب بیشتر از میرایی ایجادشده توسط سیلیکون می‌باشد [۱۲].

۳- بررسی تجربی میراگرهای ویسکوالاستیک

برای بررسی رفتار مکانیکی میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای، ابتدا دو نوع ماده پلیمری توصیه‌شده در سایر پژوهش‌ها، با تغییرات اندکی در ترکیب‌ها، به‌منظور ساخت میراگری با خواص مکانیکی مطلوب، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند.

در ترکیبات استفاده‌شده برای ساخت این دو پلیمر، اجزای فرعی کاملاً یکسان بوده‌اند و تنها تفاوت آن‌ها در نوع پلیمر پایه می‌باشد.

پس از انتخاب ترکیب مناسب، میراگرهایی در ابعاد واقعی ساخته شد و تأثیر سایر پارامترها، از جمله شکل



شکل ۲- نمودار هیستریزس مواد ویسکوالاستیک

در این شکل، تعاریف نمادها به‌صورت زیر است:
 F_0 : حداکثر نیرویی که ماده در هر چرخه بارگذاری، ظرفیت تحمل آن را دارد.
 F_1 : نیروی متناظر با بیشینه جابه‌جایی در هر چرخه است.

F_2 : نیرویی که ماده بدون ایجاد هیچ‌گونه جابه‌جایی می‌تواند تحمل کند.

منحنی هیستریزس مواد ویسکوالاستیک، نقش اساسی در تعیین مشخصات دینامیکی آن‌ها دارد. برای مثال، با استفاده از نمودار هیستریزس، ضریب اتلاف انرژی را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه نمود:

$$\eta = \frac{E''}{E'} = \frac{F_2}{F_1} \quad (۱)$$

متغیر E' نشان‌دهنده بخشی از انرژی است که به‌صورت الاستیک در ماده ذخیره می‌شود و پس از حذف بارگذاری، به‌طور کامل بازیابی می‌گردد. متغیر E'' بیانگر آن بخش از انرژی است که در طول چرخه بارگذاری مستهلک شده و قابل‌بازیابی نیست. معادله زیر مقدار میرایی در هر چرخه بارگذاری را تعریف می‌کند:

$$E_d = \pi \gamma_0^2 E' \eta V \quad (۲)$$

η ، ضریب اتلاف، مشخصه ماده ویسکوالاستیک می‌باشد که از تقسیم مدول برشی نرم بر مدول برشی سخت به‌دست می‌آید.

سایر پارامترهای موجود در معادله (۲)، به‌ترتیب معرف حجم و نسبت جابه‌جایی به ضخامت ماده هستند که به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

هدف از این آزمایش، مقایسه رفتار دینامیکی دو ماده پلیمری، جهت انتخاب ترکیب مناسب تر برای ساخت میراگر ویسکوالاستیک در ابعاد واقعی بوده است.



شکل ۳- نمونه میراگر ویسکوالاستیک صفحه ای

شکل ۴، نحوه اعمال بارگذاری چرخه ای بر میراگرهای ویسکوالاستیک صفحه ای در ابعاد کوچک، با استفاده از دستگاه یونیورسال را نشان می دهد. در این آزمایش، میراگرها تحت بارگذاری کنترل شده با کرنش های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ درصد قرار گرفتند و برای هر دامنه یک چرخه بارگذاری اعمال شد تا رفتار مکانیکی و ظرفیت اتلاف انرژی آنها بررسی شود.



شکل ۴- بارگذاری میراگر ویسکوالاستیک صفحه ای

شکل ۵، نمودار هیستریزیس مربوط به دو میراگر ویسکوالاستیک صفحه ای ساخته شده در ابعاد کوچک را نشان می دهد. نمودار هیستریزیس مربوط به ماده مبتنی بر لاستیک طبیعی در شکل ۵- الف، و نمودار ماده ویسکوالاستیک مبتنی بر لاستیک کلرو بوتیل در شکل ۵- ب ارائه شده است.

براساس معادله (۲) که پیش تر معرفی شده بود و با استفاده از ضریب اتلاف انرژی و سایر پارامترهای

هندسی و شرایط بارگذاری، بر عملکرد مکانیکی میراگر ویسکوالاستیک استوانه ای مورد ارزیابی قرار گرفت.

۳-۱- بررسی رفتار مکانیکی مواد ویسکوالاستیک بر پایه پلیمر طبیعی و کلرو بوتیل

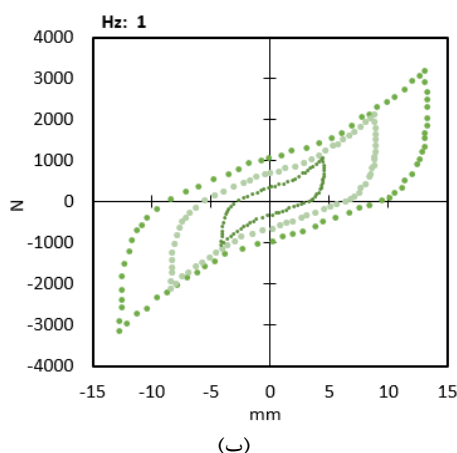
مواد ویسکوالاستیک را می توان با هزاران ترکیب مختلف تولید کرد، که هر ترکیب، خواص مکانیکی ویژه ای از خود نشان می دهد. از این رو، یافتن ترکیب مناسب برای ساخت مواد ویسکوالاستیک، جهت استفاده در میراگرهای ویسکوالاستیک که با ویژگی های مورد انتظار مطابقت داشته باشد، مستلزم طی مراحل متعدد و پیچیده ای است.

علاوه بر این، به دلیل تنوع گسترده مواد پلیمری، تمامی این مواد در بازارهای محلی، از جمله در بازار ایران، به واسطه شرایط خاص اقتصادی و تجاری، همواره قابل دسترس نیستند. بنابراین، در انتخاب ترکیبات مورد نظر برای ساخت میراگرهای ویسکوالاستیک، لازم است امکان تأمین مواد اولیه از بازار داخلی نیز مدنظر قرار گیرد.

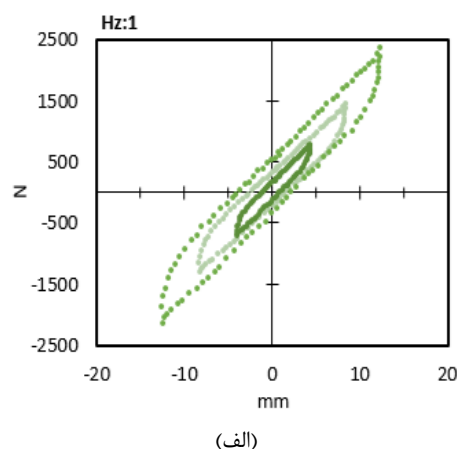
در این مطالعه، دو ترکیب متفاوت در پلیمر پایه، با در نظر گرفتن مواد در دسترس در بازار ایران، انتخاب و اصلاح شدند. برای بررسی خواص مکانیکی این ترکیبات منتخب، دو نمونه میراگر صفحه ای، با ابعاد یکسان و تفاوت در ماده ویسکوالاستیک، ساخته شده است. شکل ۳، نمونه میراگر ویسکوالاستیک صفحه ای ساخته شده در ابعاد کوچک را نشان می دهد.

این میراگرها شامل دو صفحه فلزی با ابعاد هشت سانتی متر طول، سه سانتی متر عرض و ۰/۴ سانتی متر ضخامت هستند، که بین آنها، لایه ای از ماده ویسکوالاستیک با ضخامت ۲/۵ سانتی متر قرار داده شده است. ترکیب به کار رفته در ساخت ماده ویسکوالاستیک نمونه اول، بر پایه لاستیک طبیعی بوده است، و نمونه دوم با استفاده از لاستیک کلرو بوتیل تهیه شده است. دو نمونه ساخته شده، با استفاده از دستگاه یونیورسال موجود در آزمایشگاه سازه دانشگاه تبریز، تحت بارگذاری چرخه ای یکسان قرار گرفتند.

مشاهده می‌شود، منحنی هیستریزیس مربوط به ماده پلیمری لاستیک طبیعی (۵- الف)، مساحت محبوس کمتری نسبت به ماده پلیمری کلروبتیل (۵- ب) دارد.



استخراج شده از منحنی‌های هیستریزیس، می‌توان نتیجه گرفت که میرایی ماده مبتنی بر لاستیک طبیعی کمتر از ماده مبتنی بر کلروبتیل است. همان‌طور که در شکل ۵



شکل ۵- نمودار هیستریزیس میراگر ویسکوالاستیک صفحه‌ای. (الف) بر پایه لاستیک طبیعی و (ب) بر پایه لاستیک کلروبتیل

فرایند ساخت میراگرهای ویسکوالاستیک در دو مرحله اصلی انجام می‌شود. مرحله نخست شامل اختلاط ماده پایه، سامانه ولکانش، مواد تقویت‌کننده و پرکننده و مواد ضدپیری است. در مرحله دوم، عوامل پخت افزوده و بلافاصله عملیات قالب‌گیری و ولکانش صورت می‌گیرد. ترکیبات تهیه شده در مرحله نخست را می‌توان برای چندین ماه نگهداری و حمل کرد؛ اما پس از ترکیب با عوامل پخت، در صورت انجام نشدن سریع قالب‌گیری و پخت، ماده ویژگی‌های خود را از دست می‌دهد و دچار افت کیفیت و تخریب می‌شود. بر همین اساس، ترکیبات مرحله اول در شرکت «بسپار سازه توس» در مشهد تهیه شد و عوامل پخت به صورت جداگانه، در کنار ترکیبات اصلی، ارسال شدند. این مواد تنها هنگام قالب‌گیری نهایی و پخت با یکدیگر ترکیب می‌شوند. شکل ۶، مواد پلیمری ترکیب شده در کارخانه و اقلام ارسالی لازم برای پخت در کارگاه را نشان می‌دهد.

میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای از دو استوانه فولادی هم‌محور تشکیل شده است، یکی درون دیگری قرار دارد و فضای حلقوی بین آنها با ماده ویسکوالاستیک پر می‌شود.

براساس نمودار هیستریزیس و معادله (۱)، در فرکانس بارگذاری برابر با یک هرتز، مقدار ضریب اتلاف انرژی برای ماده لاستیک طبیعی ۰/۳۵ و برای ماده پایه کلروبتیل ۰/۴۰ به دست آمد. همچنین، مدول برشی سخت و مدول برشی نرم برای لاستیک طبیعی به ترتیب ۱/۴ و ۰/۵۵، و برای لاستیک کلروبتیل به ترتیب ۱/۲۵ و ۰/۵۰ محاسبه گردید. این نتایج نشان می‌دهند که اگرچه مدول برشی نرم در کلروبتیل اندکی کمتر از لاستیک طبیعی است، اما به دلیل نسبت بالاتر مدول نرم به مدول سخت، کارایی میرایی آن بهتر ارزیابی می‌شود.

۳-۲- فرایند ساخت میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای در ابعاد واقعی

بر پایه نتایج آزمایش‌های بارگذاری میراگرهای صفحه‌ای، از ماده پایه کلروبتیل برای ساخت میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای با اعمال تغییراتی در برخی ترکیبات استفاده شد. با توجه به چسبندگی بالای این ماده هنگام اختلاط با سایر اجزا، آماده‌سازی آن با تجهیزات موجود در کارگاه‌های محلی امکان‌پذیر نبود. از این‌رو، فرمول‌بندی موردنظر به شرکت «بسپار سازه توس» در مشهد سپرده شد.

است. بنابراین، بدون استفاده از قالب مناسب، پخت ماده در محل مورد نظر امکان‌پذیر نیست.

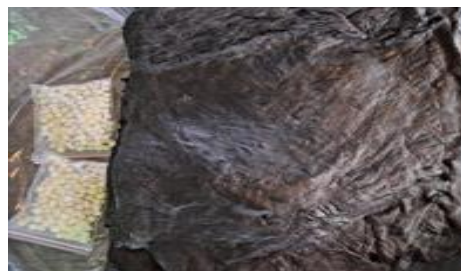
به‌منظور ارزیابی خواص مکانیکی میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای ساخته شده، تمامی آزمایش‌های بارگذاری چرخه‌ای با استفاده از جک هیدرولیکی با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلونیوتن در مرکز تحقیقات مدیریت بحران دانشگاه ارومیه و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. این جک توسط آزمایشگاه مرجع اداره راه کالیبره شده است و دقت آن در اندازه‌گیری نیرو برابر با یک نیوتن و در اندازه‌گیری جابجایی معادل یک هزارم میلی‌متر می‌باشد. شکل ۸ جزئیات محل نصب زیر جک بارگذاری و میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای را در محل آزمون نشان می‌دهد.



شکل ۸- ستاپ بارگذاری میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای

بارگذاری در چهار دامنه جابه‌جایی شامل چهار، هشت، ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر و با سرعت ۶۰ سانتی‌متر بر دقیقه انجام شد. برای هر دامنه جابه‌جایی، سه چرخه بارگذاری اجرا شد. با توجه به اینکه ضخامت ماده ویسکوالاستیک هشت میلی‌متر است، این بارگذاری‌ها به‌ترتیب معادل کرنش‌های ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ درصد هستند. شکل ۹ منحنی‌های هیستریزیس به‌دست‌آمده از بارگذاری چرخه‌ای میراگر ویسکوالاستیک را نشان می‌دهد.

براساس منحنی هیستریزیس مربوط به دامنه جابه‌جایی ۱۶ میلی‌متر، نیروی اندازه‌گیری‌شده برای F_1 ، معادل با ۲۰ کیلونیوتن و نیروی متناظر با F_2 ، برابر با پنج کیلونیوتن است. بر مبنای تعریف ضریب اتلاف انرژی (نسبت F_2 به F_1)، مقدار این ضریب برای میراگر



شکل ۶- مواد ترکیب‌شده و عوامل پخت

در این پژوهش برای ساخت میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای از فولاد با مقاومت بالا استفاده شد. استوانه بیرونی توخالی است و قطر داخلی آن برابر هشت سانتی‌متر است. قطر خارجی استوانه داخلی ۶/۴ سانتی‌متر است. بنابراین ضخامت لایه ویسکوالاستیک در این میراگر ۰/۸ سانتی‌متر است. شکل ۷ اجزای میراگر استوانه‌ای و قالب‌های مورد استفاده را پیش از تزریق ماده ویسکوالاستیک نشان می‌دهد.



شکل ۷- اجزای میراگر استوانه‌ای و قالب‌ها

به‌منظور اطمینان از چسبندگی مناسب بین ماده ویسکوالاستیک و فولاد، سطح داخلی استوانه‌های فلزی به روش سندبلاست آماده‌سازی شد. برای فرایند پخت ماده ویسکوالاستیک از قالب‌هایی استفاده شد که نه تنها استوانه‌های داخلی و خارجی را در موقعیت خود و بدون جابه‌جایی در برابر فشار ناشی از تزریق ماده نگه می‌دارند، بلکه در فرایند حرارت‌دهی نیز به‌صورت مستقیم به کار می‌روند. پخت ماده ویسکوالاستیک شامل تزریق تحت فشار در محل مورد نظر و اعمال دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد

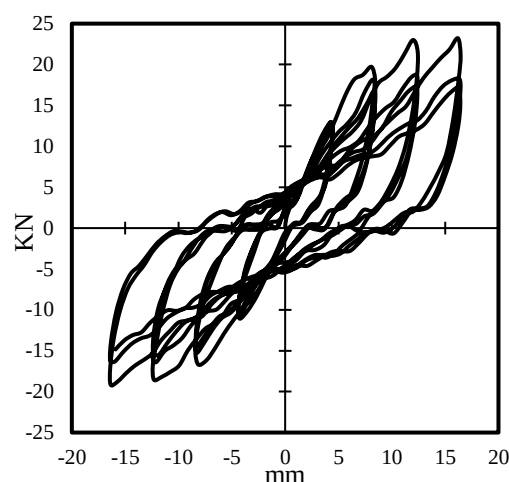
امکان بررسی پاسخ مکانیکی میراگر در سطوح کرنش ۵۰ تا ۲۰۰ درصد فراهم شود. ترکیب ماده پلیمری پایه اهمیت ویژه‌ای داشت، زیرا خواص مکانیکی و عملکرد میرایی میراگرها به طور مستقیم تابع مشخصات شیمیایی و فیزیکی ماده ویسکوالاستیک به کار رفته در ساخت آنها است. براساس مطالعات پیشین، لاستیک کلرو بوتیل به عنوان ماده پلیمری اصلی انتخاب شد، زیرا این ماده پیشتر عملکرد مناسبی در زمینه میرایی و سختی نشان داده بود. ترکیب نهایی شامل اجزای تقویت‌کننده، پایدارکننده، نرم‌کننده و عوامل پخت است؛ اجزای دقیق در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- ترکیبات ماده ویسکوالاستیک

درصد	ترکیبات ماده ویسکوالاستیک
۸۰	لاستیک کلرو بوتیل
۲۰	لاستیک نیتریل
۱۰	پلی اتیلن کلردار
۳	دوده تقویت‌کننده
۲	گوگرد
۲۰	روغن پارافینی
۳/۵	رزین کومارون
۱	اسید استئاریک
۵	اکسید روی
۱/۵	شتاب‌دهنده CBS
۱/۵	شتاب‌دهنده ZDEC

با توجه به حساسیت مواد ویسکوالاستیک به نرخ بارگذاری، دما و دامنه جابه‌جایی، در این بخش تمرکز بر بررسی اثر نرخ بارگذاری بر رفتار چرخه‌ای میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای است. برای این منظور، نمونه‌ای از میراگر استوانه‌ای با ترکیب پلیمری پایه کلرو بوتیل، که مشخصات دقیق آن در جدول ۱ آمده است و با مشخصات هندسی شامل قطر داخلی ۷۴ میلی‌متر، ضخامت لایه ویسکوالاستیک ۸ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر ساخته شد. آزمایش‌های بارگذاری به صورت چرخه‌ای و تحت نرخ‌های ۲۰ و ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه و دامنه‌های جابه‌جایی چهار، هشت، ۱۲ و ۱۶ میلی‌متر، با سه چرخه برای هر دامنه، انجام شد. هدف اصلی این آزمایش‌ها مقایسه

ویسکوالاستیک استوانه‌ای ساخته‌شده با ماده کلرو بوتیل و با قطر هشت سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر برابر ۰/۲۵ به دست می‌آید.



شکل ۹- نمودار هیستریزیس میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای فرمول‌های محاسبه مدول برشی سخت و ضعیف به صورت زیر است:

$$G_1 = \frac{F_1 t}{n_v A_v u_0} \quad (5)$$

$$G_2 = G_1 \eta \quad (6)$$

پارامترهای موجود در این معادله در بخش دوم به تفصیل تشریح شد. با جایگذاری پارامترهای به دست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که مدول برشی سخت میراگر ساخته‌شده برابر با ۱/۱۷ مگاپاسکال و مدول برشی ضعیف آن برابر با ۰/۲۹ مگاپاسکال است.

۳-۳- بررسی رفتار دینامیکی میراگرهای ویسکوالاستیک استوانه‌ای تحت تاثیر فرکانس بارگذاری

در این مرحله از پژوهش، به منظور بررسی تاثیر نرخ‌های مختلف بارگذاری بر رفتار چرخه‌ای میراگرهای ویسکوالاستیک، یک نمونه استوانه‌ای با قطر بیرونی هشت سانتی‌متر و ارتفاع بیست سانتی‌متر طراحی و ساخته شد. ضخامت لایه ویسکوالاستیک در این نمونه برابر هشت میلی‌متر در نظر گرفته شد و ارتفاع موثر آن نیز معادل ۱۰۰ میلی‌متر تعیین شد. این ابعاد به گونه‌ای انتخاب شدند که

اثر بگذارد، طراحی آزمایش ویژه‌ای برای مطالعه این موضوع در نظر گرفته شد.

برای این منظور، دو میراگر استوانه‌ای با ابعاد کلی یکسان طراحی و ساخته شد، به‌طوری که تنها تفاوت آنها ضخامت ماده ویسکوالاستیک بود. این تفاوت با تغییر قطر استوانه داخلی میراگر حاصل شد. در یکی از نمونه‌ها ضخامت لایه ویسکوالاستیک هشت میلی‌متر و در نمونه دیگر پنج میلی‌متر در نظر گرفته شد.

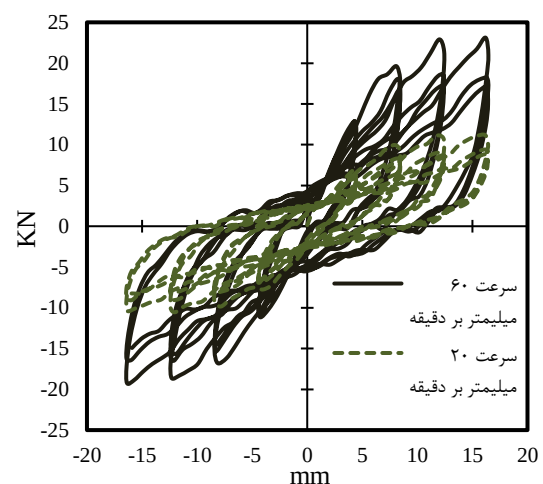
هر دو میراگر با ترکیب پلیمری یکسان و فرآیند ساخت مشابه تهیه شد تا اثر پارامترهای دیگر حذف شود و تنها تأثیر ضخامت ارزیابی گردد. سپس نمونه‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای کنترل‌شده قرار گرفتند تا امکان مقایسه رفتار هیستریزیس آنها فراهم شود. هدف این آزمایش‌ها بررسی تغییرات شکل منحنی‌های هیستریزیس، ظرفیت جذب انرژی و میزان سختی مؤثر میراگرها در واکنش به ضخامت‌های متفاوت لایه ویسکوالاستیک بود.

شکل ۱۱، نمایی از دو میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای با ضخامت‌های متفاوت و نحوه استقرار آنها در دستگاه بارگذاری را نمایش می‌دهد. نتایج این بخش از مطالعه، مبنای مهمی برای بهینه‌سازی طراحی هندسی میراگرهای ویسکوالاستیک در کاربردهای مهندسی لرزه‌ای فراهم می‌کند.

پس از فرآیند ساخت و آماده‌سازی، هر دو نمونه تحت بارگذاری سیکلی یکسانی قرار گرفتند. این بارگذاری با سرعت ثابت ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه و در سطح کرنش ۲۰۰ درصد اعمال شد تا بتوان رفتار واقعی میراگرها را در شرایط بارگذاری دینامیکی شبیه‌سازی نمود.

برای بارگذاری میراگرهای ویسکوالاستیک مطابق آزمایشات پیشین، از دستگاه جک هیدرولیکی موجود در مرکز مدیریت بحران دانشگاه ارومیه استفاده گردید. همانطور که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است، درون استوانه‌های داخلی میراگرهای ویسکوالاستیک یک حفره رزوه‌شده وجود دارد که شفت مرکزی به داخل آن پیچ

نمودارهای هیستریزیس و تحلیل تغییرات سختی، میرایی و ظرفیت باربری در نرخ‌های بارگذاری مختلف است. شکل ۱۰، نمودارهای هیستریزیس میراگر ویسکوالاستیک را در سرعت‌ها و دامنه‌های مختلف بارگذاری نشان می‌دهد. در این نمودار، خطوط سیاه نمایانگر پاسخ تحت سرعت ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه و خطوط سبز نماینده پاسخ تحت سرعت ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه است.



شکل ۱۰- نمودار هیستریزیس میراگر ویسکوالاستیک تحت نرخ بارگذاری متفاوت.

همان‌طور که از شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ بارگذاری، میرایی و ظرفیت باربری میراگر ویسکوالاستیک ساخته‌شده نیز افزایش می‌یابد.

۳-۴- بررسی رفتار دینامیکی میراگرهای ویسکوالاستیک استوانه‌ای با ضخامت‌های مختلف ماده ویسکوالاستیک

در مرحله بعد پژوهش، به منظور تحلیل دقیق‌تر عملکرد مکانیکی میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای، تأثیر ضخامت لایه ویسکوالاستیک بر رفتار هیستریزیس، ظرفیت باربری و میزان اتلاف انرژی بررسی گردید. از آنجا که ضخامت لایه ویسکوالاستیک از پارامترهای مؤثر بر رفتار دینامیکی میراگرهاست و می‌تواند بر سختی مؤثر، تغییر شکل و پایداری آنها در برابر بارگذاری‌های چرخه‌ای

می‌گردد. بارگذاری از طریق شفت مرکزی به میراگر اعمال می‌شود.

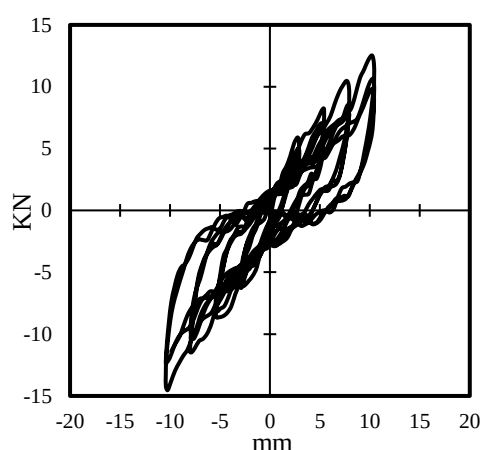
شکل ۱۲، نتایج حاصل از آزمایش را به صورت منحنی‌های هیستریزیس برای هر دو میراگر، با ضخامت‌های ۸ و ۵ میلی‌متر، نمایش می‌دهد. در شکل ۱۲-الف، نمودار هیستریزیس میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای با ضخامت

ماده ویسکوالاستیک ۸ میلی‌متر، قطر خارجی ۸۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر را مشاهده می‌کنید.

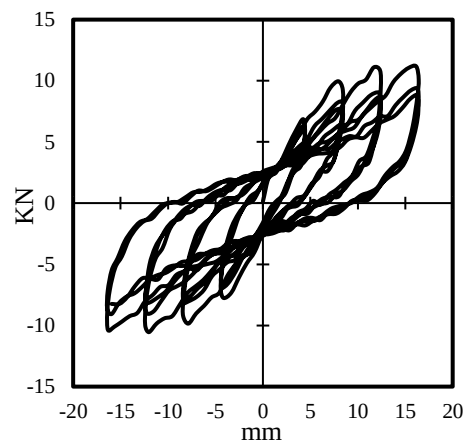
شکل ۱۲-ب، نمودار هیستریزیس میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای با قطر خارجی ۸۰ میلی‌متر، ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ماده ویسکوالاستیک ۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- دو میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای با ضخامت‌های ۵ و ۸ میلی‌متر و جک بارگذاری



(ب)



(الف)

شکل ۱۲- نمودار هیستریزیس میراگرهای ویسکوالاستیک با ضخامت (الف) ۸ و (ب) ۵ میلی‌متر

نتایج مشاهدات بررسی‌های تجربی نشان می‌دهند که کاهش ضخامت ماده ویسکوالاستیک بر پایه پلیمر کلرو بوتیل در یک میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای، از یک سو به معنای کاهش مقدار ماده مصرفی است و از سوی دیگر، تاثیر محسوسی بر عملکرد میرایی سیستم ندارد. با این حال، ضخامت ماده ویسکوالاستیک به عنوان یک پارامتر محدودکننده در میزان کرنشی که میراگر قادر به تحمل آن است، عمل می‌کند. اگرچه برخی مواد ویسکوالاستیک قادر به تحمل کرنش‌هایی تا حدود ۲۰۰ درصد هستند، اما این

براساس نتایج به دست آمده، کاهش ضخامت ماده ویسکوالاستیک به طور جزئی موجب کاهش میرایی سیستم می‌شود، در حالی که ظرفیت باربری آن را افزایش می‌دهد. این تغییرات ناشی از افزایش سختی برشی میراگر ویسکوالاستیک در پی کاهش ضخامت ماده ویسکوالاستیک است. با کاهش ضخامت، ماده ویسکوالاستیک مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل از خود نشان می‌دهد که این امر منجر به افزایش سختی و در نتیجه ظرفیت باربری سیستم می‌گردد [۴۸].

کاهش ضخامت سقف کرنش قابل تحمل و به تبع آن دامنه جابه‌جایی مجاز را محدود می‌کند و باید در طراحی عملی مدنظر باشد.

به‌طور کلی، میراگرهای ویسکوالاستیک استوانه‌ای بر پایه کلرو بوتیل گزینه‌ای معتبر و اقتصادی برای افزایش میرایی سازه‌ای هستند و به‌دلیل سادگی نصب و امکان سفارشی‌سازی هندسه و ترکیب ماده، دامنه گسترده‌ای از نیازهای مکانیکی را پوشش می‌دهند.

رفتار وابسته به نرخ در سرعت‌های بالاتر بارگذاری همچنان نیازمند مطالعه تکمیلی است. به نظر می‌رسد، همانند سایر ویژگی‌های مواد ویسکوالاستیک، افزایش سرعت تا آستانه‌ای مشخص موجب افزایش ظرفیت باربری و میرایی می‌شود و پس از آن، با ادامه افزایش سرعت بارگذاری، تغییر معناداری در رفتار مکانیکی میراگر مشاهده نمی‌شود [۴۹]. همچنین حساسیت پاسخ مکانیکی به شکل و ابعاد، مسئله بهینه‌سازی هندسی را به یکی از چالش‌های اصلی طراحی تبدیل می‌کند.

بر این مبنا، ادامه پژوهش در این محورها پیشنهاد می‌شود:

- ۱- بررسی عملکرد میراگرها در شرایط دمایی گوناگون، به‌ویژه در نواحی با نوسانات شدید دما، برای ارزیابی پایداری حرارتی مواد ویسکوالاستیک.
- ۲- به‌کارگیری ترکیبات نوین پلیمری و نانوپرکننده‌ها با هدف بهینه‌سازی هم‌زمان سختی و میرایی.
- ۳- مطالعه خستگی و دوام بلندمدت میراگرها تحت بارگذاری‌های تکراری و در شرایط میدانی واقعی.
- ۴- ارزیابی تاثیر ابعاد هندسی بر رفتار مکانیکی میراگرها و تدوین رویکردی برای طراحی ابعاد بهینه.

۵- نتیجه‌گیری

یکی از اهداف این پژوهش، بررسی تأثیر نوع پلیمر پایه بر رفتار و ویژگی‌های دینامیکی میراگرهای

موضوع بدین معناست که میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای با ضخامت ۵ میلی‌متر، تنها می‌تواند حداکثر جابه‌جایی برابر با ۱۰ میلی‌متر را تحمل کند.

۴- بحث و بررسی

در این مطالعه، عملکرد مکانیکی میراگرهای ویسکوالاستیک استوانه‌ای بر پایه پلیمر کلرو بوتیل تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای ارزیابی شد و منحنی‌های هیستریزیس به‌دست آمده از آزمایش‌های تجربی مورد بررسی قرار گرفت. با طراحی آزمایش‌های کنترل‌شده و تحلیل داده‌های به‌دست آمده از منحنی‌های هیستریزیس، اثر پارامترهای کلیدی شامل نرخ بارگذاری، ضخامت لایه ویسکوالاستیک و دامنه کرنش بررسی شد.

در گام نخست، مقایسه دو فرمولاسیون پلیمری مبتنی بر لاستیک طبیعی و کلرو بوتیل در مقیاس آزمایشگاهی نشان داد کلرو بوتیل از نظر شاخص‌های میرایی کارا تر است و این نتیجه اهمیت انتخاب ترکیب مناسب پلیمری را در ارتقای پاسخ دینامیکی میراگرها برجسته می‌کند.

در ادامه، نمونه‌های تمام‌مقیاس استوانه‌ای ساخته و تحت آزمون‌های چرخه‌ای با نرخ‌های بارگذاری و دامنه‌های جابه‌جایی متفاوت قرار گرفتند. نتایج نشان داد با افزایش نرخ بارگذاری از ۲۰ به ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه، ضریب میرایی و ظرفیت تحمل بار به‌طور معناداری افزایش می‌یابد. این روند بیانگر رفتار وابسته به نرخ در ماده ویسکوالاستیک است و با افزایش سرعت بارگذاری، سختی موثر و انرژی مستهلک‌شده در هر چرخه افزایش می‌یابد.

در بررسی اثر ضخامت، کاهش ضخامت لایه ویسکوالاستیک از هشت به پنج میلی‌متر تغییر محسوس در میرایی ایجاد نکرد اما ظرفیت باربری را افزایش داد. این یافته از دیدگاه طراحی حائز اهمیت است زیرا نشان می‌دهد می‌توان با صرفه‌جویی در مصرف ماده و بدون افت محسوس در میرایی، به ظرفیت باربری بالاتر دست یافت. با این حال،

ویسکوالاستیک بود. به منظور انتخاب ماده‌ای مناسب برای ساخت میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای، در گام نخست، دو نمونه میراگر صفحه‌ای در مقیاس کوچک ساخته شد و تحت بارگذاری چرخه‌ای توسط دستگاه یونیورسال قرار گرفت. نتایج حاصل از نمودارهای هیستریزس نشان داد که مواد مبتنی بر کلرو بوتیل در جابجایی معادل ۱۳ میلی‌متر، ظرفیت باربری معادل ۳ کیلونیوتن دارند، در حالی که این مقدار برای لاستیک طبیعی برابر با ۲ کیلونیوتن است. مواد پلیمری مبتنی بر کلرو بوتیل در جابجایی ۱۳ میلی‌متر، انرژی بیشتری را نسبت به مواد پلیمری بر پایه لاستیک طبیعی مستهلک می‌کنند، به طوری که میزان اتلاف انرژی در آنها دو برابر بیشتر از لاستیک طبیعی است.

یک میراگر ویسکوالاستیک استوانه‌ای با ابعاد 20×8 سانتی‌متر و با استفاده از ماده ویسکوالاستیک بر پایه کلرو بوتیل با ضخامت 0.8 سانتی‌متر ساخته شد و تحت بارگذاری چرخه‌ای در سطوح مختلف کرنش و سرعت‌های مختلف قرار گرفت. منحنی هیستریزس به دست آمده از این آزمایش، رفتار پایدار میراگر را در کرنش ۲۰۰ درصد نشان داد. در بارگذاری با سرعت ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه، ظرفیت باربری میراگر در جابجایی معادل ۱۶ میلی‌متر حدوداً ۲۰ کیلونیوتن بود، در حالی که این مقدار در سرعت بارگذاری ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه به ۱۰ کیلونیوتن کاهش یافت. علاوه بر افزایش ظرفیت باربری در سرعت‌های بالاتر، میزان میرایی نیز تقریباً دو برابر افزایش یافت.

به منظور بررسی تأثیر ضخامت ماده ویسکوالاستیک، دو میراگر استوانه‌ای با ضخامت‌های ۵ و ۸ و ارتفاع ۱۰۰ و

قطر ۸۰ میلی‌متر ساخته شد و تحت بارگذاری با کرنش ۲۰۰ درصد قرار گرفت. نتایج نشان داد که ظرفیت باربری در نرخ بارگذاری یکسان برای جابجایی معادل کرنش ۲۰۰ درصد در میراگر با ضخامت ۵ میلی‌متر، تقریباً $1/5$ نیوتن بیشتر از میراگر با ضخامت ۸ میلی‌متر است. به طور خاص، میراگر با ضخامت ۵ میلی‌متر در جابجایی ۱۰ میلی‌متر، ظرفیت باربری $12/5$ نیوتن دارد و میراگر با ضخامت ۸ میلی‌متر در جابجایی ۱۶ میلی‌متر، ظرفیت باربری ۱۱ کیلونیوتن دارد. این امر به طور عمده به سخت‌شدگی ماده ویسکوالاستیک در ضخامت‌های کمتر نسبت داده می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که میراگرهای ویسکوالاستیک استوانه‌ای، با وجود استفاده از حجم نسبتاً کم ماده ویسکوالاستیک، توانایی بالایی در اتلاف انرژی دارند. مواد مبتنی بر کلرو بوتیل نه تنها عملکرد میرایی قابل توجهی را از خود نشان می‌دهند، بلکه در سطوح بالای کرنش نیز رفتار پایداری از خود بروز می‌دهند. افزون بر این، نتایج نشان داد که با افزایش دامنه جابه‌جایی، میرایی و ظرفیت باربری در همه میراگرها و الگوهای بارگذاری به طور هم‌سو افزایش می‌یابد.

قدردانی

نویسندگان مقاله، بر خود لازم می‌دانند مراتب سپاس و قدردانی صمیمانه خود را از پژوهشکده مدیریت بحران، خطرپذیری و مهندسی زیرساخت‌ها، به واسطه همکاری ارزشمند و فراهم‌سازی امکان استفاده از جک هیدرولیکی جهت انجام آزمایش‌های این پژوهش، ابراز نمایند.

References

- [1] Zhang ZX, Ping Y, He X. Self-Centering Shape Memory Alloy-Viscoelastic Hybrid Braces for Seismic Resilience. *Materials*. 2022; 15(7): 2349. doi: 10.3390/ma15072349
- [2] Nguyen VQ, Nizamani ZA, Park D, Kwon OS. Numerical Simulation of Damage Evolution of Daikai Station During the 1995 Kobe Earthquake. *Engineering Structures*. 2020; 206: 110180. doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110180
- [3] Park R, Paulay T. Reinforced Concrete Structures. New York: Wiley; 1975.
- [4] Zarrineghbal A, Zafarani H. Investigating Uncertainty in Seismic Design Maps Based on Hazard and Fragility Curves. *Civil Infrastructure Researches*. 2025; 11(1): 1-14. doi: 10.22091/cer.2024.11285.1572 [In Persian]
- [5] Luo QB, Dai F, Liu Y, Gao MT. Numerical Modelling of the Near-Field Velocity Pulse-Like Ground Motions of the Northridge Earthquake. *Acta Geophysica*. 2020; 68(5): 993-1006. doi: 10.1007/s11600-020-00459-4

- [6] McCormick J, Aburano H, Ikenaga M, Nakashima M. Permissible Residual Deformation Levels for Building Structures Considering Both Safety and Human Elements. In: Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering; 2008; Beijing, China. Beijing: Seismological Press of China.
- [7] Pourmirza R, Amirabadi R, Sharifi M. Experimental Evaluation of Seismic Performance of Pile-to-Deck Connections: A Case Study of Common Pile Caps in Iran. *Civil Infrastructure Researches*. 2025; 11(1): 167-183. doi: 10.22091/cer.2025.12047.1592 [In Persian]
- [8] Xekalakis G, Perelli FL, Zuccaro G, Kyriakides N, Christou P. Developing Seismic Mitigation Measures for Sustainable Cities: A Structured Database Approach. In: Proceedings of the Ninth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment; 2023. doi: 10.1117/12.2680830
- [9] Haseli B, Kheiri O. Seismic Damage Detection in Reinforced Concrete Piers of Kordestan–Mullasadra Bridges (Numerical Study) Using RID Functions and Tensor Method. *Civil Infrastructure Researches*. 2020; 5(2): 31-49. doi: 10.22091/cer.2019.4500.1156 [In Persian]
- [10] Abdeli M, Manafpour A. Development and Experimental Validation of a New Self-Centering HF2V Damper with Disc Springs. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2022; 20(13): 7417-7440. doi: 10.1007/s10518-022-01495-9
- [11] Karbaschi ME, Anvar SA. Evaluating the Accuracy of the FEMA-356 Proposed Equation for Effective Damping Ratio for Viscous and Viscoelastic Dampers. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 2018; 50(2): 303-314. doi: 10.22060/ceej.2017.11416.5045 [In Persian]
- [12] Shu Z, You R, Zhao Y. Viscoelastic Materials for Structural Dampers: A Review. *Construction and Building Materials*. 2022; 342: 127955. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127955
- [13] Spencer BF Jr, Nagarajaiah S. State of the Art of Structural Control. *Journal of Structural Engineering*. 2003; 129(7): 845-856. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:7(845)
- [14] Saeed TE, Nikolakopoulos G, Jonasson JE, Hedlund H. A State of the Art Review of Structural Control Systems. *Journal of Vibration and Control*. 2015; 21(5): 919-937. doi: 10.1177/1077546313478294
- [15] Norihide K. State of the Art in Structural Control Technology. *Journal of the Acoustical Society of Japan*. 2006; 62(7): 539-544.
- [16] Federal Emergency Management Agency. NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 274). Washington, DC: FEMA; 1997.
- [17] Higgins C, Kasai K. Experimental and Analytical Simulation of Wind Response for a Full-Scale Viscoelastically Damped Steel Frame. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1998; 77-78: 297-313. doi: 10.1016/S0167-6105(98)00151-2
- [18] Shu Z, You R, Xie Y. Viscoelastic Dampers for Vibration Control of Building Structures: A State of the Art Review. *Journal of Earthquake Engineering*. 2024; 28(12): 3558-3585. doi: 10.1080/13632469.2024.2345180
- [19] Lago A, Trabucco D, Wood A. Damping Technologies for Tall Buildings: Theory, Design Guidance and Case Studies. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2018; 533-711.
- [20] The Japan Society of Seismic Isolation. Design and Construction Manual of Passive Damping Structure. 2nd ed. Tokyo: The Japan Society of Seismic Isolation; 2008.
- [21] Castaldo P, De Iuliis M. Optimal Integrated Seismic Design of Structural and Viscoelastic Bracing Damper Systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2014; 43(12): 1809-1827. doi: 10.1002/eqe.2425
- [22] Cheng FY, Jiang H, Lou K. Smart Structures: Innovative Systems for Seismic Response Control. Boca Raton: CRC Press; 2008 Feb. doi: 10.1201/9781420008173
- [23] Fathi F, Bahar O. Hybrid Coupled Building Control for Similar Adjacent Buildings. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2017; 21(1): 265-273. doi: 10.1007/s12205-016-0708-x
- [24] Zhou Y, Gong SM, Lu XL. Study on Similarity of Hysteretic Loops and Characteristic Parameters of Viscoelastic Dampers with Test Verifications. *Applied Mechanics and Materials*. 2013; 353-356: 1970-1975. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.353-356.1970
- [25] Patri M, Reddy CV, Narasimhan C, Samui AB. Sequential Interpenetrating Polymer Network Based on Styrene-Butadiene Rubber and Polyalkyl Methacrylates. *Journal of Applied Polymer Science*. 2007; 103(2): 1120-1126. doi: 10.1002/app.24338
- [26] Xu ZD, Liao YX, Ge T, Xu C. Experimental and Theoretical Study of Viscoelastic Dampers with Different Matrix Rubbers. *Journal of Engineering Mechanics*. 2016; 142(8): 04016051. doi: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001101
- [27] Paolacci F. An Energy-Based Design for Seismic Resistant Structures with Viscoelastic Dampers. *Earthquakes and Structures*. 2013; 4(2): 219-239. doi: 10.12989/eas.2013.4.2.219
- [28] Cermak JE, Woo HGC, Lai ML, Chan J, Danielson SL. Aerodynamic Instability and Damping of a Suspension Roof. In: Proceedings of the 3rd Asia-Pacific Symposium on Wind Engineering; 1993; 699-704.
- [29] Keel CJ, Mahmoodi P. Designing of Viscoelastic Dampers for Columbia Center Building. In: Isyumov N, Tschanz T, editors. Building Motion in Wind. Seattle, WA: American Society of Civil Engineers; 1986; 66-81.

- [30] Yuan B, Chen M, Liu Y, Zhao S, Jiang H. Damping Properties of Para-Phenylene Terephthalamide Pulps-Modified Damping Materials. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2017; 36(2): 137-148. **doi: 10.1177/0731684416673726**
- [31] Xu Z, Ge T, Liu J. Experimental and Theoretical Study of High-Energy Dissipation Viscoelastic Dampers Based on Acrylate-Rubber Matrix. *Journal of Engineering Mechanics*. 2020; 146(6): 04020057. **doi: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001802**
- [32] Hujare PP, Sahasrabudhe AD. Experimental Investigation of Damping Performance of Viscoelastic Material Using Constrained-Layer Damping Treatment. *Procedia Materials Science*. 2014; 5: 726-733. **doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.404**
- [33] Xia L, Li C, Zhang X, Wang J, Wu H, Guo S. Effect of Chain Length of Polyisobutylene Oligomers on the Molecular Motion Modes of Butyl Rubber: Damping Property. *Polymer*. 2018; 141: 70-78. **doi: 10.1016/j.polymer.2018.01.083**
- [34] Capps RN, Beumel LL. Dynamic Mechanical Testing: Application of Polymer Development to Constrained-Layer Damping. In: Corsaro RD, Sperling LH, editors. *Sound and Vibration Damping with Polymers*. Washington, DC: American Chemical Society. 1990. **doi: 10.1021/bk-1990-0424.ch004**
- [35] Roshan-Tabari F, Toopchi-Nezhad H, Hashemi-Motlagh G. Development and Testing of a Novel High-Damping Chlorobutyl Rubber for Structural Viscoelastic Damper Devices. *Civil Engineering Infrastructures Journal*. 2024; 57(2): 337-355. **doi:10.22059/ceij.2023.363315.1951**
- [36] Ge T, Huang XH, Guo YQ, He ZF, Hu ZW. Investigation of Mechanical and Damping Performances of Cylindrical Viscoelastic Dampers in Wide Frequency Range. *Actuators*. 2021; 10(4): 71. **doi: 10.3390/act10040071**
- [37] Zhou Y, Shi F, Ozbulut OE, Xu H, Zi D. Experimental Characterization and Analytical Modeling of a Large-Capacity High-Damping Rubber Damper. *Structural Control and Health Monitoring*. 2018; 26(6): e2183. **doi: 10.1002/stc.2183**
- [38] Luo W, Li H, Zhou Y, Zhou H. Seismic Performance of Lead-Filled Steel Tube Damper: Laboratory Test, Parameter Identification and Application. *Engineering Structures*. 2020; 219: 110764. **doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110764**
- [39] Gauron O, Tremblay R, Labelle J. Seismic Control of a Three-Story Steel Structure Using Elastomeric Dampers and Chevron Braces. *Sherbrooke University Technical Report*. TR-SUS-2015-05. 2015.
- [40] Zhang Y, Li J, Wang H, Chen X, Zhang L. Experimental Research on Seismic Behavior of Haunched Concrete Beam-Column Joint Based on the Bolt Connection. *Sustainability*. 2022; 14(5): 2985. **doi: 10.3390/su14052985**
- [41] Nasab MSE, Kim J. Seismic Retrofit of Structures Using Hybrid Steel Slit-Viscoelastic Dampers. *Journal of Structural Engineering*. 2020; 146(11): 04020238. **doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002816**
- [42] Shen KL, Soong TT, Chang KC, Lai ML. Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Frame with Added Viscoelastic Dampers. *Engineering Structures*. 1995; 17(5): 372-380. **doi: 10.1016/0141-0296(95)00020-8**
- [43] Tsai CS. Temperature Effect of Viscoelastic Dampers During Earthquakes. *Journal of Structural Engineering*. 1994; 120(2): 394-409. **doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:2(394)**
- [44] Xu ZD, Wang DX, Shi CF. Model, Tests and Application Design for Viscoelastic Dampers. *Journal of Vibration and Control*. 2011; 17(9): 1359-1370. **doi: 10.1177/1077546310373617**
- [45] Gillani A. Development of Material Model Subroutines for Linear and Nonlinear Response of Elastomers. Master's thesis. London (ON): The University of Western Ontario. 2018.
- [46] Chen B, Dai J, Song T, Guan Q. Research and Development of High-Performance High-Damping Rubber Materials for High-Damping Rubber Isolation Bearings: A Review. *Polymers*. 2022; 14(12): 2427. **doi: 10.3390/polym14122427**
- [48] Rijnen MWLM, Pasteuning F, Fey RHB, van Schothorst G, Nijmeijer H. A Numerical and Experimental Study on Viscoelastic Damping of a 3D Structure. *Journal of Sound and Vibration*. 2015; 349: 80-98. **doi: 10.1016/j.jsv.2015.03.053**
- [49] Syed RUH, Sabir MI, Jiang W, Shi DY. Effect of Viscoelastic Material Thickness of Damping Treatment Behavior on Gearbox. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2012; 4(17): 3130-3136.