مقالهٔ پژوهشی

DOI: 10.52547/ciauj.9.1.526

سال نهم، شماره اول – بهار و تابستان ۱۴۰۳

ارزیابی لرزه‌ای و اثربخشی تکنیک‌های استحکام‌بخشی سازه مطالعه موردی: دودکش صنعتی کارخانه چرم خسروی تبریز

صفیه نامی*[۱]، اما هاروتونیان[۲]، سپهر آمر[۳]، وحید نوداد[۴]

[۱] مربی، دانشکده معماری و شهرسازی، هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

[۲] استاد، گروه معماری، دانشکده معماری، دانشگاه ملی معماری و ساخت‌وساز ارمنستان، ایروان، جمهوری ارمنستان

[۳] کارشناسی‌ارشد معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران

[۴] دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد مرند، دانشگاه آزاد اسلامی، مرند، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲)

چکیده

کارخانه چرم خسروی تبریز به عنوان نماد ورود صنعت و مدرنیته به ایران دارای اهمیت تاریخی بسیاری است. این کارخانه پس از احیاء به بخش جدایی‌ناپذیر از محوطه دانشگاه هنر اسلامی تبریز تبدیل شد. محور اصلی این تحقیق دودکشی واقع در این مجموعه هست که در دوره پهلوی اول ساخته شده است.

این پژوهش بر رفتار دینامیکی این دودکش صنعتی که سازه‌ای بلند و باریک بوده و در برابر نیروهای لرزه‌ای آسیب‌پذیر است، تمرکز دارد. همچنین با توجه به قرار گرفتن شهر تبریز در منطقه پر خطر لرزه‌ای، اهمیت مطالعه این بنا بیش از پیش احساس می‌شود.

در این مقاله، تکنیک استحکام‌بخشی اجرا شده که شامل نصب حلقه‌های فلزی در اطراف دودکش است، به‌طور کامل بررسی می‌گردد. در ابتدا با استفاده از آزمایش دینامیکی مودال، رفتار و اثربخشی این تکنیک استحکام‌بخشی تحلیل شد. این آزمایش در دو مرحله یک بار با وجود حلقه‌ها و در مرحله بعدی بدون وجود حلقه‌ها انجام گرفت. همچنین اثربخشی حلقه‌ها با مدل المان محدود و آنالیز پوش‌اُور (Pushover) نیز بررسی و نتایج حاصل از جای‌گذاری‌های مختلف حلقه‌ها با یکدیگر مقایسه شدند. بر اساس نتایج آزمایش و تغییرات فرکانس مشاهده شده و نیز نتایج آنالیز پوش‌اور، مشهود است که این تکنیک استحکام بخشی به بهبود مطلوب در عملکرد سازه دست نیافته است.

واژگان کلیدی

ارزیابی لرزه‌ای، تکنیک‌های استحکام بخشی سازه، دودکش‌های صنعتی، کارخانه چرم خسروی، آزمایش دینامیک

* نویسندهٔ مسئول مکاتبات:s.nami@tabriziau.ac.ir

حق نشر متعلق به نویسنده(گان) است و نویسنده تحت مجوز Creative Commons Attribution License به مجله اجازه میدهد مقاله چاپ شده را با دیگران به اشتراک بگذارد منوط بر اینکه حقوق مؤلف اثر حفظ و به انتشار اولیه مقاله در این مجله اشاره شود.

[DOI: 10.52547/ciauj.9.1.526]

۱. مقدمه

حفظ و ارتقای عملکرد لرزه‌ای در سازه‌های تاریخی و صنعتی توجه زیادی را در زمینه‌های مهندسی و مرمت معماری به خود جلب کرده است. اطمینان از یکپارچگی سازه‌ای این ساختمان‌ها درحالی‌که آن‌ها را با استانداردهای ایمنی مدرن هماهنگ می‌کند، چالش‌های منحصر به فردی را ایجاد می‌کند که اغلب به تکنیک‌های نوآورانه استحکام‌بخشی نیاز دارد. در این زمینه، مطالعه حاضر بررسی جامعی را با تمرکز بر پاسخ دینامیکی و تحلیل عددی یک دودکش تاریخی صنعتی تحت یک روش استحکام‌بخشی خاص ارائه می‌کند.

هدف اصلی این پژوهش ارزیابی اثربخشی تکنیک استحکام‌بخشی به‌کار گرفته شده است که شامل قرار دادن حلقه‌های فلزی جهت افزایش مقاومت دودکش در برابر نیروهای لرزه‌ای است.

سازه‌های تاریخی مانند دودکش مورد بررسی، اغلب فاقد مدارک طراحی اولیه هستند. در نتیجه این پژوهش روشی را اتخاذ می‌کند که آزمایش‌های دینامیکی، مدل‌سازی عددی پیشرفته و تحلیل لرزه‌ای را برای ارائه بینش‌های ارزشمند، در مورد رفتار سازه و تأثیر رویکرد استحکام‌بخشی ترکیب می‌کند.

با توجه به عدم وجود اطلاعات سازه‌ای لازم، تمام پارامترهای مورد استفاده در مطالعه از آزمایش‌های میدانی مشتق شده‌اند که از ارزیابی مناسب و دقیق اطمینان می‌دهند. فاز آزمایشی شامل آزمایش مودال عملیاتی است که در دو مرحله انجام می‌شود و درک دقیقی از پاسخ دودکش به تحریک لرزه‌ای ارائه می‌دهد. علاوه بر این، یافته‌های آزمایش جهت صحت سنجی مدل عددی به‌کار می‌رود و شبیه‌سازی رفتار سازه را تحت شرایط مختلف، هم قبل و هم بعد از اجرای استحکام‌بخشی ممکن می‌سازد.

این مطالعه نشان داد که روش استحکام‌بخشی انتخاب شده با حلقه‌های فلزی تأثیر محدودی بر ارتقای رفتار سازه دارد و در نتیجه زمانی که حلقه‌ها در موقعیت بهینه قرار می‌گیرند تنها ۹/۱۶ درصد مقاومت سازه افزایش می‌یابد.

بخش‌های بعدی این مقاله به بررسی تکنیک استحکام‌بخشی به‌کار گرفته شده می‌پردازد؛ همچنین مطالعه دینامیکی سازه‌ای، روش‌های تجربی و تحلیل عددی را به تفصیل ارائه می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده به‌طور انتقادی تجزیه‌وتحلیل و مورد بحث قرار می‌گیرند تا میزان تأثیر تکنیک استحکام‌بخشی بر پاسخ سازه را آشکار کنند.

۲. مروری بر پژوهش‌های گذشته

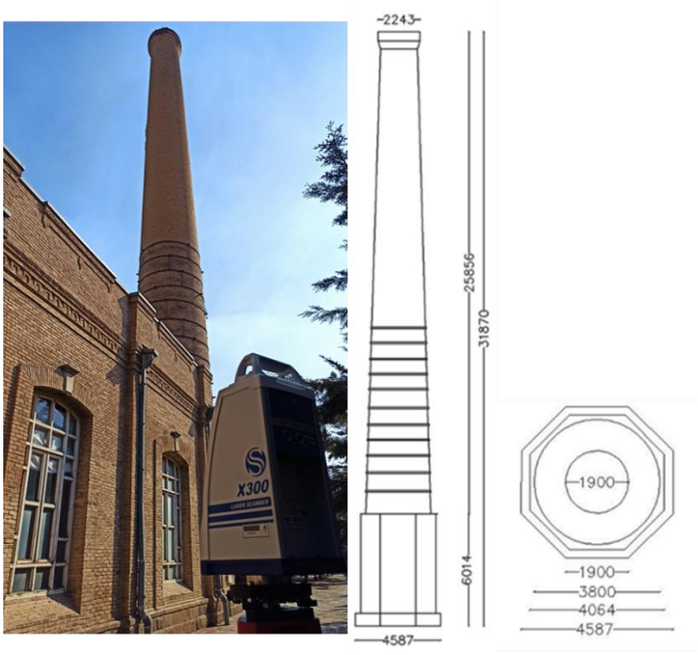
با توجه به گسترش شهرها و ورود دودکش‌های صنعتی به نواحی شهری، همراه با حساسیت این سازه‌های بلند و انعطاف‌پذیر در برابر خطرات لرزه‌ای، مطالعات متعددی جهت بررسی دقیق چنین بناهایی انجام شده است. نمونه‌ای از تحقیقات این حوزه در پژوهشی با عنوان «پس تنیدگی حلقوی با FRP در داخل بندهای ملات و پس تنیدگی عمودی به‌وسیله فولاد ضدزنگ برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای و باد دودکش‌های بنایی تاریخی» یافت می‌شود (Viskovic et al., 2019). در مقاله دیگری با عنوان «پاسخ‌های دینامیکی دودکش‌های بتن مسلح صنعتی تقویت شده با FRP» به‌طور گسترده نشان می‌دهد که هدف از این مطالعه تعیین تأثیر تقویت FRP بر پاسخ‌های دینامیکی دودکش‌های RC صنعتی است (Karaca et al., 2015). همچنین، مثال دیگری که توسط با عنوان «ارزیابی لرزه‌ای دودکش بنایی تقویت شده با CFRP» قابل‌ذکر است. این مقاله به‌طور خلاصه نتایج یک مطالعه آزمایشگاهی مورد استفاده جهت کالیبراسیون مدل عددی دودکش بنایی صنعتی را ارائه می‌کند (Pallare´s et al., 2009). در مطالعه تحقیقاتی دیگری با عنوان «آزمایش‌های بارگذاری جانبی بر روی یک ساختمان RC واقعی شامل پانل‌های پرکننده بنایی با و بدون استحکام FRP»، دو آزمایش پلاستیک یا بارگذاری جانبی را بر روی یک ساختمان RC بتن مسلح واقعی با مصالح بنایی توصیف می‌کنند (Corte et al., 2008).

[DOI: 10.52547/ciauj.9.1.526]

۳. مطالعه موردی: توصیف دودکش تاریخی

محور این تحقیق دودکشی واقع در شهر تبریز است که در دوره پهلوی اول ساخته شده است. با این حال، هیچ طرح معماری یا جزئیات ساخت‌وساز در دسترس نیست. در نتیجه تمام اطلاعات مورد نیاز برای این مطالعه در محل و از طریق آزمایش‌های متنوع به دست آمد (Nami & Akhoundi, 2022, p. 3).

به دلیل نبود نقشه‌های معماری، هندسه بنا با استفاده از اسکن لیزری مشخص شد (Nami & Akhoundi, 2022, p. 3). در سال‌های اخیر، این سازه تحت یک روش استحکام‌بخشی قرار گرفته است که شامل نصب ۱۱ حلقه فلزی در فواصل تقریباً یک متری دور دودکش می‌شود. (شکل ۱- الف) یک تصویر از دودکش را نشان می‌دهد، درحالی‌که (شکل ۱- ب) مدارک بنا را پس از برداشت نشان می‌دهد.



شکل ۱: الف) تصویر دودکش؛ ب) مشخصات هندسی دودکش بنایی

٤. تست مودال عملیاتی

شناسایی خصوصیات دینامیکی سازه در بسیاری از زمینه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. از این رو تجزیه‌وتحلیل مودال تجربی (EMA) روشی مناسب جهت شناسایی پارامترهای دینامیکی سازه‌ها و ارائه یک مدل عددی است (Ghalishooyan & Shooshtari, 2015).

در سازه‌های با مقیاس بزرگ که تحریک مؤثر سازه و اندازه‌گیری نیروهای وارده به سازه غیرممکن است، روش‌هایی که نیاز به تحریک مستقیم و اندازه‌گیری نیرو در شناسایی پارامتر مودال ندارند، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. این روش‌ها به‌عنوان آنالیز مودال عملیاتی (OMA) یا تحلیل مودال محیطی شناخته می‌شوند (Salehi et al., 2018, p. 55).

ارزیابی ایمنی سازه و حفظ بناهای بلند بنایی تاریخی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. این بناها سازه‌های نسبتاً باریکی هستند و بارهای مرده قابل‌توجهی را تحمل می‌کنند. در نتیجه اغلب حساسیت بالایی نسبت به اقدامات دینامیکی، مانند ارتعاشات ناشی از ترافیک، باد و زلزله از خود نشان می‌دهند. در این زمینه، تجزیه‌وتحلیل مودال تجربی و تحلیل مودال عملیاتی ابزار ایدئالی برای ارزیابی رفتار دینامیکی سازه یا انجام صحت‌سنجی دقیق مدل‌های المان محدود قبل از استفاده در تحلیل عددی

[DOI: 10.52547/ciauj.9.1.526]

جهت ارزیابی ایمنی لرزه‌ای است (Gentile, Saisi, & Cabboi, 2012, p. 1).

تحلیل مودال همیشه بر اساس سه مرحله زیر است:

– اجرای آزمایش؛

– استخراج پارامترهای مودال؛

– صحت‌سنجی مدل (Rainieri & Fabbrocino, 2011).

٤-١. روش آزمایش

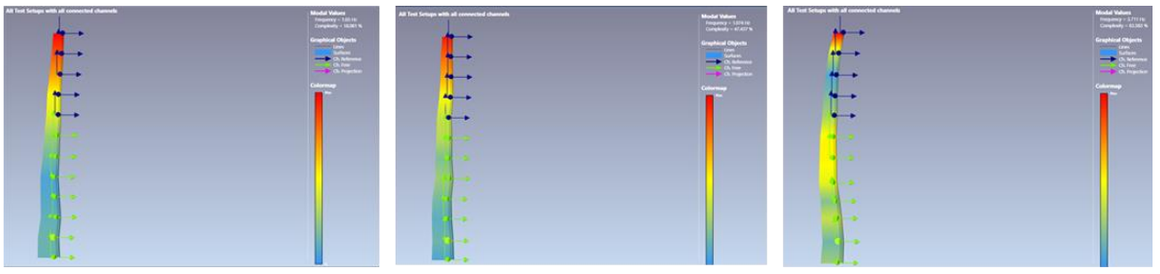
آزمون مودال عملیاتی در دو مرحله با حلقه‌ها و بدون حلقه‌ها اجرا شـــد (شـــکل ۲). در هر دو مرحله، آزمایش مودال عملیاتی با استفاده از دوازده شتاب سنج کابلی که در فواصل ۲,۵ متری قرار گرفته بودند، انجام شد (Nami & Akhoundi, 2022, p. 5). در (جدول ۱) مشهود است که فرکانس‌های به دست آمده برای هر دو مورد با و بدون حلقه، یکسان هستند. عدم تغییر در فرکانس‌ها، نشان‌دهنده عدم تغییر در سختی سازه نیز هست. همچنین در (شکل ۳) و (شکل ٤) اشکال مودی برای سه مود اول سازه در هر دو حالت بدون حلقه و با حلقه نشان داده شده است.

شکل ۲: مراحل تست مودال عملیاتی

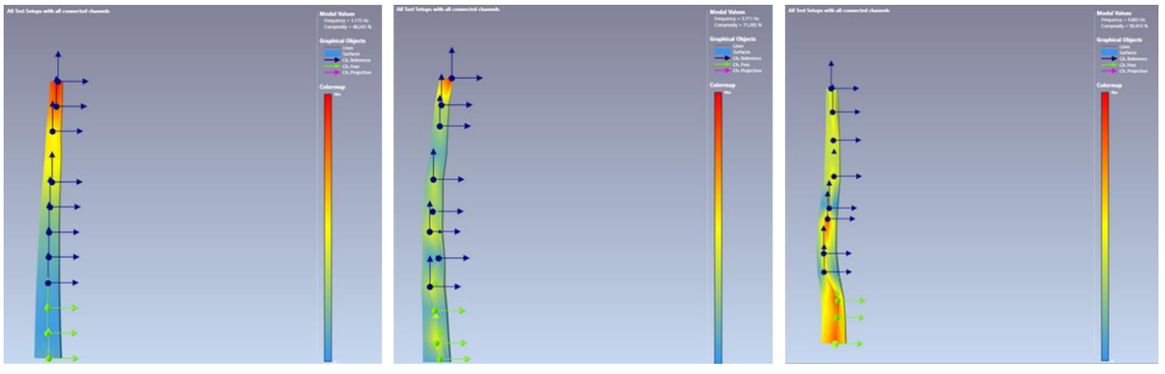
جدول ۱: فرکانس مودهای سازه به دست آمده از آزمایش مودال عملیاتی (با حلقه و بدون حلقه)

	بدون حلقه‌ها					با حلقه‌ها				
شماره مود	مود۱	مود۲	مود۳	مود۴	مود۵	مود۱	مود۲	مود۳	مود۴	مود۵
فرکانس(HZ)	۱,۰۵	۱,۰۷۴	۳,۷۱	۳,۷۳	**۸,۲۲**	۷,۰۶	۳,۶۶	۳,۶۱	۱,۰۷۳	۱,۰۵

[DOI: 10.52547/ciauj.9.1.526]



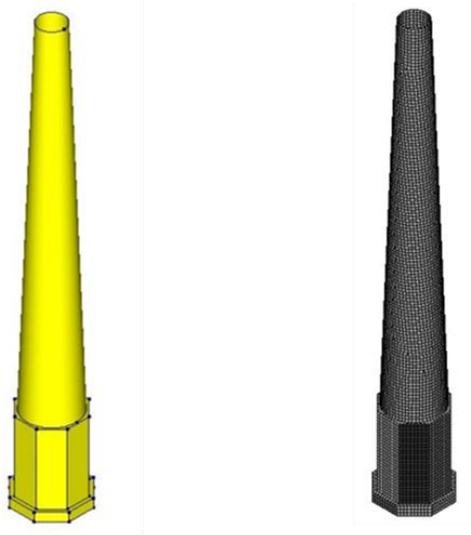
شکل ۳: سه مود اول سازه در جهت X (بدون حلقه)



شکل ۴: سه مود اول سازه در جهت X (با حلقه)

۵. مدل‌سازی عددی

این مطالعه از رویکرد بزرگ مقیاس برای ساده‌سازی مدل عددی و افزایش کارایی محاسباتی استفاده کرد. با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری‌شده یک مدل عددی دقیق جهت انجام تحلیل‌ها ساخته شد (شکل ۵). ویژگی‌های مصالح به‌کار رفته در این مطالعه به شرح (جدول ۲) است.



شکل ۵: الف) مدل دودکش، ب) مش‌بندی مدل

[DOI: 10.52547/ciauj.9.1.526]

ویژگی‌های مصالح به‌کار رفته در این مطالعه به شرح زیر است:

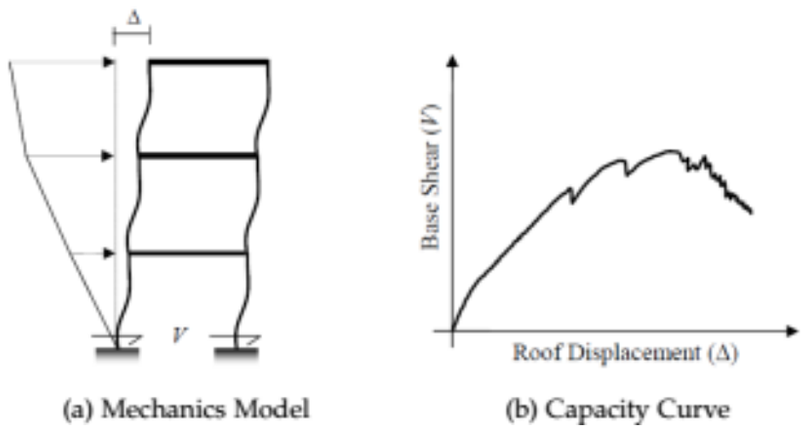
جدول ۲: مقادیر مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل دودکش

خواص مصالح	مدول الاستیک GPa	جرم مخصوص Kg/m3	ضریب پواسون	f_c KPa	f_t KPa
مصالح بنایی	۲,۳۴	۱۹۰۰	۰,۲۵	۱۰۰۱	۱۰۰,۱

مقاومت فشاری و مدول الاستیک از آزمایش‌های جک دوتایی به دست آمده و مقدار مقاومت کششی ۰,۱ مقاومت فشاری در نظر گرفته شد.

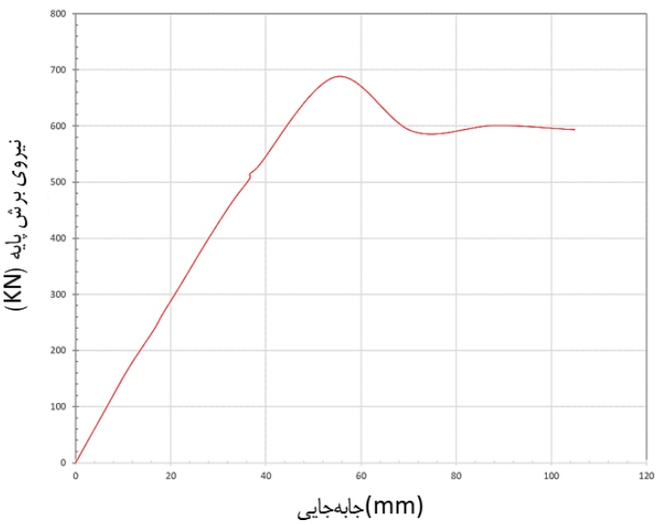
٦. تجزیه‌وتحلیل پوش‌اور

تحلیل پوش‌اور یک روش استاتیکی غیرخطی است که برای تحلیل لرزه‌ای استفاده می شود. تحلیل پوش‌اور روشی است که در آن مقدار بار جانبی برانگیخته شده در سازه تا زمان شکست به صورت یکنواخت افزایش می‌یابد. رابطه بین تغییر مکان و برش پایه متعاقباً در یک منحنی ظرفیت رسم می‌شود (شکل ٦) (Noortman, 2019, p. 32).



شکل ۶: نمایش شماتیک روش تحلیل پوش‌اور (Noortman, 2019, p. 34)

نتایج تحلیل پوش‌اور سازه در حالت بدون حلقه‌ها و با حلقه‌ها مورد مقایسه قرار گرفتند. (شکل ۷) منحنی ظرفیت به دست آمده از تحلیل پوش‌اور سازه را قبل از استحکام بخشی نشان می‌دهد. بر این اساس، حداکثر نیروی برشی ٦٨٧,٥ KN و سختی ١٤,٥ KN/mm است.

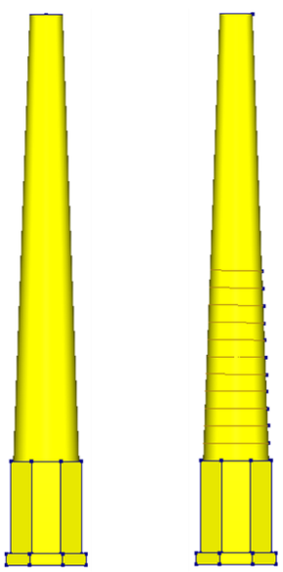


شکل ۷: منحنی پوش‌اور

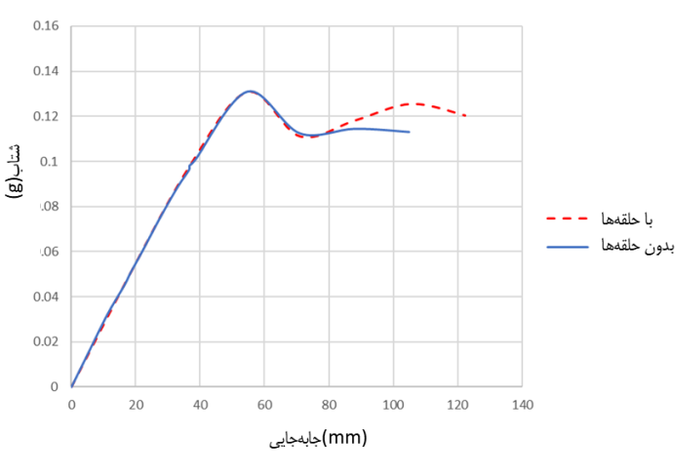
[DOI: 10.52547/ciauj.9.1.526]

۷. سازه پس از استحکام‌بخشی

در سال‌های اخیر از حلقه‌های فلزی به عنوان تکنیک استحکام‌بخشی بنا استفاده شده است. این پژوهش بر ارزیابی تأثیر این روش متمرکز است. بر این اساس، تحلیل پوش‌اور متناسب با جرم جهت بررسی روش‌های مختلف استفاده از این تکنیک اجرا شد و با استفاده از منحنی ظرفیت تغییرات سختی و مقاومت در هر حالت بررسی گردید (شکل ۸). ابتدا برای بررسی اثربخشی تکنیک استحکام‌بخشی (با استفاده از حلقه)، آنالیز پوش‌اور در دو حالت بدون حلقه و با حلقه انجام شد. وجود حلقه‌ها به صورت فعلی تأثیر قابل‌توجهی در افزایش استحکام و سختی سازه آن نداشت. در هر دو حالت حداکثر مقاومت سازه ۰,۱۳g است (شکل ۹).



شکل ۸: مدل دودکش الف) بدون حلقه، ب) پس از استحکام‌بخشی با حلقه



شکل ۹: مقایسه تحلیل پوش‌اور قبل و بعد از استحکام‌بخشی با حلقه

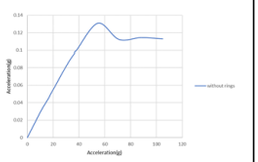
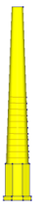
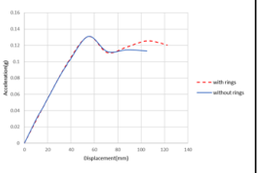
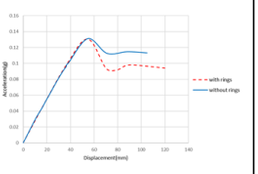
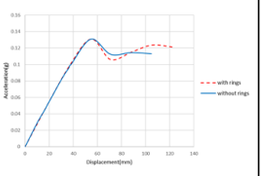
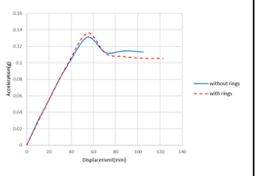
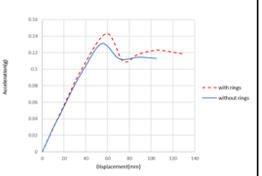
مطابق (جدول ۳)، انواع جای‌گذاری حلقه‌ها مورد بررسی قرار گرفت تا تأثیر این روش بررسی شود. بر این اساس در مرحله اول سه حلقه در پایین مخروط قرار گرفت و هیچ تغییری در مقاومت و سختی سازه در مقایسه با حالت بدون حلقه مشاهده نشد. در مرحله بعد در مجموع ۷ حلقه به صورت پراکنده تا میانه ارتفاع دودکش قرار داده شد. بازهم هیچ تأثیری بر سختی و مقاومت سازه نداشت.

[DOI: 10.52547/ciauj.9.1.526]

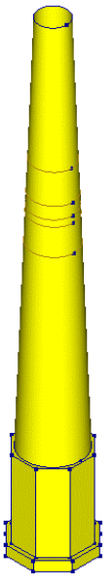
در مرحله بعد تعداد ۵ حلقه در وسط دودکش بررسی شد. در این حالت با تحلیل نمودارها افزایش ۳ درصدی مقاومت نسبت به حالت بدون حلقه مشاهده شد. نهایتاً با قرار دادن حلقه‌ها در یک سوم ارتفاع دودکش، جایی که محل تشکیل مفصل در مود دوم سازه است بیشترین تأثیر این روش مشاهده گردید (شکل ۱۰).

بر اساس منحنی‌های پوش‌اور، تحت بهترین حالت (شکل ۱۱)، استحکام سازه نسبت به حالت قبل از استحکام‌بخشی تقریباً ۹/۱۶ درصد افزایش یافت. بر اساس نتایج مقاومت از ۰,۱۳۱ g به ۰,۱۴۵ g افزایش یافته است. با این حال، این درصد افزایش برای استحکام‌بخشی بنا رضایت‌بخش نیست.

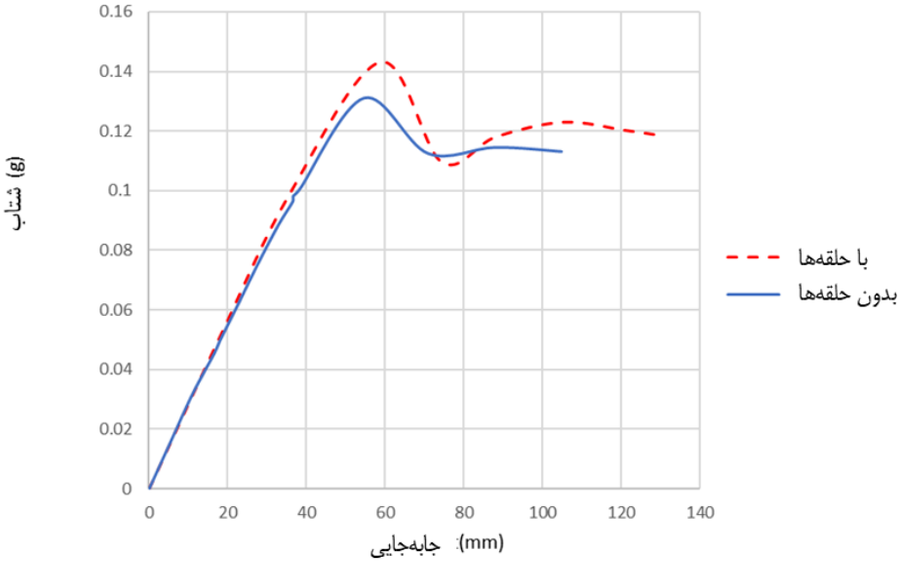
جدول ۳: مقایسه تحلیل پوش‌اور در جای‌گذاری‌های مختلف حلقه‌ها

گزینه‌های مورد بررسی	منحنی‌های پوش‌اور	درصد تغییرات
بدون حلقه‌ها		———
 با حلقه‌ها (شرایط موجود)		0.00%
با حلقه‌ها سه حلقه در قسمت پایین (مخروط دودکش)		0.00%
با حلقه‌ها هفت حلقه در قسمت پایین (مخروط دودکش)		0.00%
با حلقه‌ها پنج حلقه در قسمت میانه (مخروط دودکش)		+3.05%
با حلقه‌ها پنج حلقه در قسمت ۱/۳ بالایی (ارتفاع دودکش)		+9.16%

[DOI: 10.52547/ciauj.9.1.526]



شکل ۱۰: مدل دودکش پس از استحکام‌بخشی با حلقه در یک سوم ارتفاع بالایی دودکش



شکل ۱۱: مقایسه تحلیل پوش‌اور قبل و بعد از استحکام‌بخشی با حلقه‌هایی در یک سوم ارتفاع بالایی دودکش

۸. نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی شد تا به عنوان یک تکنیک مقاوم سازی در دودکش‌های صنعتی تاریخی ا ستفاده از حلقه‌های فلزی مورد بررسی قرار گیرد از این رو دودکش کارخانه چرم خسروی مورد مطالعه قرار گرفت. برای بررسی اثر حلقه‌ها، آنالیز مودال تجربی بر روی سازه در دو مرحله بدون حلقه‌ها و با حلقه‌ها انجام شد. نتایج به دست آمده، تغییرات قابل‌توجهی را در فرکانس‌های سازه در دو حالت مختلف نشان نمی‌دهد بنابراین هیچ تغییر محسوسی در سختی بنا ایجاد نشده است.

در بخش دوم، مدل‌سازی عددی و تحلیل منحنی‌های پوش‌اور به‌دست‌آمده در هر دو حالت (با حلقه و بدون حلقه) نشان می‌دهد که تغییری در مقاومت و سختی سازه مورد مطالعه م شاهده ن شده و حداکثر مقاومت آن ۰,۱۳g ا ست. جای‌گذاری‌های مختلف حلقه‌ها بر روی سازه نیز مورد بررسی قرار گرفت و در بهترین حالت تأثیر این تکنیک در انتهای یک سوم دودکش مشاهده شد

[DOI: 10.52547/ciauj.9.1.526]

که در این حالت مقاومت ۹,۱۶ در صد افزایش یافت؛ اما این افزایش رضایت‌بخش نیست و این راهکار نتایج رضایت‌بخشی را جهت استحکام‌بخشی بنا در برنداشته است.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از جناب آقای دکتر فرهاد آخوندی بابت راهنمایی و حمایت ارزشمند ایشان در طول فرآیند تحقیق صمیمانه سپاسگزاری می‌نماییم. همچنین این پژوهش با منابع و امکانات دانشگاه هنر اسلامی تبریز میسر گردید.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان اول و سوم: مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، نوشتن پیش‌نویس اصلی، جمع‌آوری داده‌ها، مدل‌سازی، تحلیل.

نویسندگان دوم و چهارم: بررسی و ویرایش، جلب اعتبار مالی، مدیریت پروژه.

فهرست منابع

Corte, G. D., Fiorino, L., & Mazzolani, F. M. (2008). Lateral-Loading Tests on a Real RC Building Including Masonry Infill Panels with and without FRP Strengthening, Materials in Civil Engineering, 20:6, pp 419-431.

Gentile, C., Saisi A., & Cabboi, A. (2012). Dynamic monitoring of a masonry tower, Proc. of the Int. Conf. SAHC 2012.

Ghalishooyan, M., & Shooshtari, A. (2015). Operational modal analysis techniques and their theoretical and practical aspects: A comprehensive review and introduction, 6th International Operational Modal Analysis Conference.

Karaca, Z., Türkeli, E., Günaydın, M., & Adanur S. (2015). Dynamic responses of industrial reinforced concrete chimneys strengthened with fiber-reinforced polymers, The structural design of tall and special buildings, 24, pp 228-241.

Nami, S., & Akhoundi, F. (2022). Understanding the Dynamic Characteristics of Industrial Masonry Chimney for Investigative Preservation: A Case Study of Khosravi Leather Factory Chimney, Iranian and Islamic Architectural and Restoration Research Journal; 5 (14):1-9. [In Persian]

نامی، صفیه و آخوندی، فرهاد. (۱۴۰۱). شناخت ویژگی‌های دینامیکی دودکش بنایی صنعتی جهت بررسی‌های حفاظتی، نمونه موردی دودکش کارخانه چرم خسروی، مجله پژوهش‌های مرمت و معماری ایرانی و اسلامی، ۵ (۱۴): ۹-۱.

Noortman, F. J. (2019). Applicability of the pushover method for the seismic assessment of URM structures in Groningen, Master thesis, TU Delft university.

Pallare´s, F. J., Ivorra, S., Pallare´s, L., & Adam J. M. (2009). Seismic assessment of a CFRP-strengthened masonry chimney, Structures and Buildings, 162, pp 291-299.

Rainieri, C., & Fabbrocino, G. (2011). Operational modal analysis for the characterization of heritage structures, GEOFIZIKA, 28, pp 109-125.

Salehi, M., Orak, M., Qurbani, M., & Ahmadi Bolotaki, M. (2018). Experimental study of the performance of different environmental modal analysis methods with simultaneous random and harmonic excitation, Iranian Mechanical Engineering Research Journal, Volume 20, Number 2, 54-71.

Viskovic, A., Antonelli, L. & Morgante, F. (2019). Annular Post-Compression by FRP inside Mortar Joints and Vertical Post-Compression by Stainless Steel, for Seismic and Wind Retrofitting of Historical Masonry Chimney, Key Engineering Materials, 817, pp 642-649.

[DOI: 10.52547/ciauj.9.1.526]