



University Of Qom



Experimental Evaluation of Seismic Performance of Pile-to-Deck Connections: A Case Study of Common Pile Caps in Iran

Rouhollah Pourmirza¹, Rouhollah Amirabadi^{2✉}, Mahdi Sharifi³

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: R.pourmirza@stu.qom.ac.ir
2. Corresponding author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: R.Amirabadi@qom.ac.ir
3. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: M.sharifi@qom.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 12 Mar 2025
Revised 17 Jul 2025
Accepted 20 Jul 2025
Published 20 Jul 2025

Keywords:
Pile Cap,
Cyclic Loading,
Seismic Behavior,
Pile-to-Deck
Connections.

ABSTRACT

This study investigates the seismic behavior and experimental analysis of two common types of pile caps used in infrastructure projects for port construction in Iran. The objective of this research is to evaluate the mechanical and energy performance of these pile caps under cyclic loading, particularly in the pile-to-deck connection regions. Two pile cap samples, namely PRC and PEST, were subjected to bending and shear loads in laboratory conditions. The results revealed that the PRC sample experienced reinforcement yielding and concrete cover cracking under similar loading conditions, whereas the PEST sample failed primarily at the welding joint between the pile and deck bolt connection. Additionally, compared to the PRC sample, the PEST sample exhibited higher stiffness, attributed to the use of steel pipes and grout in its construction. On the other hand, the energy absorption capacity and hysteretic damping in the PRC sample were higher, especially at higher drifts, than in the PEST sample. These findings have direct implications for the design and performance of port structures under seismic loads. The results of this study can contribute to improving the design of pile-to-deck connections and enhancing the performance of structures against seismic forces.

Cite this article: 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. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.12047.1592>



Introduction

Ports are fundamental components of national infrastructure, supporting the flow of goods, economic growth, and regional development. In earthquake-prone countries like Iran, the seismic safety and functionality of port facilities are of paramount importance, as structural failures during seismic events can disrupt trade, cause significant economic losses, and endanger human lives. Among marine structures, pile-supported wharves are widely used due to their adaptability to various soil conditions and their ability to resist both vertical and lateral loads. However, the pile-to-deck connection, especially the pile cap region, represents a critical and vulnerable point under seismic excitation, where inelastic deformations and damage are likely to concentrate. While analytical and numerical investigations on pile-wharf systems exist, there remains a notable gap in experimental studies specifically addressing the cyclic seismic performance of commonly used pile-to-deck connections in Iran. A detailed understanding of their behavior under realistic loading conditions is crucial for developing effective seismic design strategies and retrofitting solutions for marine infrastructure. This research addresses this gap by conducting laboratory-based cyclic loading tests on two prevalent pile cap connection types—PRC (rebar and concrete) and PEST (external steel pipe and grout)—adopted in Iranian marine wharves.

Methodology

In this research, two typical pile-to-deck connection types, known as PRC (utilizing rebar and concrete) and PEST (employing an external steel pipe filled with grout), were selected based on the design details of existing marine wharves in the Persian Gulf. Laboratory specimens were constructed at a 1:3 scale, each comprising a steel pile, a reinforced concrete deck, and the corresponding pile cap connection. The PRC specimen featured longitudinal rebars extended from the pile into the deck and encased in concrete, while the PEST specimen used a larger steel pipe sleeve

with grout to connect the pile to the deck via a steel plate and welded joints. Comprehensive instrumentation, including strain gauges, displacement transducers (LVDTs), and load cells, was installed to monitor key response parameters such as lateral displacement, curvature, load, and energy dissipation throughout the tests. Quasi-static cyclic lateral loading was applied to the free end of the deck using a hydraulic actuator, following the ACI 374.1-05 protocol to simulate earthquake-induced displacements. Each specimen was subjected to increasing drift ratios until failure, and the force–displacement behavior, failure modes, and energy absorption were systematically recorded and analyzed.

Results and Discussion

The experimental results revealed significant differences in the seismic behavior of the two connection types. The PEST specimen achieved an ultimate lateral load capacity of 56.6 kN, about 7% higher than the PRC specimen (53.0 kN), and exhibited approximately 15% greater initial stiffness. This superior strength and stiffness were primarily attributed to the steel pipe and grout configuration in the PEST connection, which enhanced load transfer efficiency. However, the PRC specimen outperformed PEST in terms of ductility and energy dissipation, achieving a ductility index of 2.6 (versus 2.2 for PEST) and 12% higher hysteretic energy absorption, particularly at higher drift levels. This suggests a better capacity for inelastic deformation and seismic energy mitigation in the PRC system. Failure mechanisms also differed: PRC predominantly failed by yielding of longitudinal rebars and cracking of the concrete cover in the deck, whereas the PEST specimen experienced premature failure at the welded joint between the steel plate and deck bolt, highlighting a potential weakness in welding details. Both connection types, however, showed some undesirable concentration of damage in the deck region rather than at the pile base, indicating the need for improved design strategies to better localize plastic hinge formation and prevent critical deck damage.

Overall, the findings provide practical insights for marine structural designers, emphasizing the trade-off between strength and ductility, and the importance of meticulous detailing, especially in welded connections.

Conclusion

This study demonstrated that while the PEST connection offers greater initial strength and stiffness due to its steel pipe and grout configuration, the PRC system provides superior ductility and energy absorption, which are critical for seismic resilience. The observed concentration of damage in the deck, rather than at the pile base, in both connection types suggests that current design details may not sufficiently promote plastic hinge formation where intended.

Accordingly, future designs should prioritize connection detailing that enables controlled plastic deformation at the pile base and enhances weld quality in steel plate joints. These improvements can help prevent premature deck failure and ensure greater durability and safety of marine structures under seismic loading.

Further research involving full-scale tests, diverse soil conditions, and advanced numerical modeling is recommended to validate the laboratory findings and develop optimized design guidelines for pile-to-deck connections in marine infrastructure.

Funding Statement

This research received no specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Declaration of Competing Interest

■ **No competing interests:** The authors declare no conflict of interest.

Authors' Contributions

Rouhollah Pourmirza:

Experimental work, data analysis, software, writing—original draft, investigation.

Rouhollah Amirabadi:

Supervision, methodology, review & editing.

Mahdi Sharifi:

Conceptualization (main idea), project administration, supervision, methodology, data

curation, validation, visualization, review & editing.

ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد لرزه‌ای اتصالات شمع به عرشه: مطالعه موردی سرشمع‌های متداول در ایران

روح اله پورمیرزا^۱، روح اله امیرآبادی^۲، مهدی شریفی^۳

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. R.pourmirza@stu.qom.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. R.Amirabadi@qom.ac.ir

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. M.Sharifi@qom.ac.ir

چکیده

این تحقیق به بررسی رفتار لرزه‌ای و تحلیل آزمایشگاهی دو نوع رایج سرشمع‌های به کار رفته در اسکله های شمع و عرشه ایران پرداخته است. هدف از این مطالعه ارزیابی عملکرد مکانیکی و انرژی این سرشمع‌ها تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای، به‌ویژه در نواحی اتصال شمع به عرشه، است. دو نمونه از سرشمع‌ها، شامل نمونه‌های PRC (میلگرد و بتن) و PEST (لوله فولادی خارجی)، تحت بارهای خمشی و برشی در آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که نمونه PRC تحت بارگذاری‌های مشابه با تسلیم میلگردها و ترک‌خوردگی پوشش بتنی عرشه مواجه شد، در حالی که در نمونه PEST، شکست عمدتاً در ناحیه جوشکاری محل اتصال شمع به بولت عرشه مشاهده گردید. همچنین، در مقایسه با نمونه PRC، نمونه PEST از سختی بیشتری برخوردار بود که ناشی از استفاده از لوله‌های فولادی و گروت در ساختار آن بود. از سوی دیگر، ظرفیت جذب انرژی و میزان میرایی هیستریزس در نمونه PRC به‌ویژه در دررفت‌های بالا بیشتر از نمونه PEST بود. نکته ی حایز اهمیت دیگر در این تحقیق وقوع مفاصل پلاستیک و خرابی‌ها در تیرهای عرشه می باشد که این مسئله نیازمند بازنگری در طراحی و یا نوع اتصال به جهت استفاده از این نوع اتصالات در اسکله هاست. این نتایج به‌طور مستقیم بر طراحی و عملکرد سازه‌های بندری تحت بارهای لرزه‌ای تأثیرگذار است. نتایج تحقیق می‌تواند به بهبود طراحی اتصالات شمع به عرشه و ارتقای عملکرد سازه‌ها در برابر بارهای لرزه‌ای کمک کند.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۲۹

کلیدواژه‌ها:

سرشمع،

بارگذاری چرخه‌ای،

رفتار لرزه‌ای،

اتصالات شمع به عرشه.

استناد: پورمیرزا روح اله، امیرآبادی روح اله، شریفی مهدی. ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد لرزه‌ای اتصالات شمع به عرشه: مطالعه موردی سرشمع‌های متداول در ایران. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی. ۱۴۰۴؛ ۱۱(۱): ۱۶۷-۱۸۳.

<https://doi.org/10.22091/cer.2025.12047.1592>

۱ - مقدمه

بنادر یکی از ارکان اساسی اقتصاد جهانی هستند که به‌عنوان دروازه‌هایی برای جابه‌جایی کالاها، منابع طبیعی و تأمین انرژی عمل می‌کنند. این زیرساخت‌های حیاتی نه تنها تجارت را تسهیل می‌کنند، بلکه با ایجاد اشتغال و رونق بخشی به صنایع مرتبط، به توسعه منطقه‌ای کمک می‌نمایند. بدین ترتیب، بنادر به‌عنوان دارایی‌های راهبردی در زیرساخت‌های هر کشور محسوب می‌شوند [۱-۳]. اطمینان از عملکرد لرزه‌ای مناسب بنادر، به‌ویژه در مناطق زلزله‌خیز، ضروری است. وقوع زلزله می‌تواند باعث اختلال گسترده در فعالیت‌های بندر از جمله بارگیری و تخلیه کالا، حمل‌ونقل و مدیریت لجستیک شود. در نتیجه، خسارات اقتصادی سنگینی ناشی از توقف عملیات و هزینه‌های بازسازی به همراه خواهد داشت [۴]. ایران، که در یکی از فعال‌ترین مناطق لرزه‌ای جهان واقع شده است، به زیرساخت‌های بندری مقاومی نیاز دارد تا آسیب‌های احتمالی ناشی از زلزله را به حداقل برساند. آسیب به این زیرساخت‌ها نه تنها باعث اختلال در تجارت بین‌المللی و زنجیره تأمین کالا می‌شود، بلکه هزینه‌های بازسازی و بازایی اقتصادی سنگینی را نیز به دنبال خواهد داشت [۴-۷]. اسکله‌های شمع‌محور، یکی از طراحی‌های رایج در بندرسازی هستند که با استفاده از شمع‌های فولادی یا بتنی و گاه چوبی وزن عرشه و نیروهای واردشده را به زمین منتقل می‌کنند و ظرفیت باربری بالایی را فراهم می‌آورند [۸]. عملکرد لرزه‌ای اسکله‌های شمع‌محور، به‌ویژه در ناحیه اتصال سرشمع به عرشه، بسیار حائز اهمیت است. این ناحیه به دلیل تمرکز بالای نیروهای خمشی و چرخشی، آسیب‌پذیرترین بخش سازه است. طراحی‌های مدرن لرزه‌ای بر ایجاد مفصل پلاستیک و متمرکز کردن خرابی در سرشمع تأکید دارند تا از آسیب به سایر بخش‌های کلیدی جلوگیری شود [۹]. این رویکرد، ضمن حفظ یکپارچگی سازه، فرآیند تعمیرات را تسهیل و هزینه‌های بازسازی را کاهش می‌دهد [۱۰-۱۳]. انتخاب سرشمع به‌عنوان نقطه

خرابی کنترل‌شده، امکان بازیابی سریع و کاهش اختلالات اقتصادی پس از زلزله را فراهم می‌کند [۱۱، ۱۴ و ۱۵]. در صنعت سازه‌های دریایی کشور، عمدتاً از دو نوع اتصال شمع‌های فولادی به عرشه استفاده می‌شود. این دو نوع اتصال شامل PRC (میلگرد و بتن) و PEST (لوله فولادی خارجی)، می‌باشد. عملکرد لرزه‌ای این نوع اتصالات بصورت آزمایشگاهی تا کنون مورد بررسی و ارزیابی قرار نگرفته است. بنابراین، هدف این پژوهش، بررسی آزمایشگاهی و مقایسه عملکرد لرزه‌ای دو نوع رایج اتصال شمع به عرشه (PRC و PEST) تحت بارگذاری چرخه‌ای است. در این راستا، این فرضیه مورد آزمون قرار می‌گیرد که تفاوت در جزئیات و نحوه اجرای این اتصالات می‌تواند به رفتارهای متفاوت در محل تمرکز آسیب، شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی منجر شود.

۲- تاریخچه تحقیقات و ضرورت انجام تحقیق

رفتار لرزه‌ای اسکله‌های شمع و عرشه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در طراحی و مقاوم‌سازی زیرساخت‌های بندری، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. مطالعات پیشین عمدتاً بر بررسی عملکرد لرزه‌ای این سازه‌ها، تحلیل شکنندگی، مقاوم‌سازی و نوآوری در طراحی متمرکز بوده‌اند. در مطالعات اولیه، تمرکز اصلی بر تحلیل رفتار اسکله‌های شمع و عرشه تحت شرایط لرزه‌ای قرار داشت. سینگ و همکاران رفتار اسکله شمع و عرشه بندر اوکلند را با تغییرات پارامتریک خاک بررسی کردند و خرابی‌های شمع‌ها و لنگرهای خمشی را تحت زلزله لوماپریتا گزارش دادند [۱۶]. به‌طور مشابه، تاکاهاشی و همکاران روانگرایی و جابجایی‌های بزرگ اسکله‌های شمع و عرشه را با استفاده از آزمایش‌های سانتریفیوژی تحلیل کرده و اهمیت اندرکنش خاک-سازه را نشان دادند [۱۷]. در سال‌های اخیر، خسروی و فر و همکاران مدلی سه‌بعدی برای شبیه‌سازی روانگرایی و پاسخ پس از آن ارائه کردند که بر شبیه‌سازی دقیق اثرات روانگرایی متمرکز بود [۱۸]. پدیده روانگرایی خاک در نواحی ساحلی می‌تواند به طور

غیرمستقیم بر عملکرد لرزه‌ای اتصالات شمع به عرشه تأثیر بگذارد، زیرا تغییر خواص مکانیکی خاک و کاهش سختی بستر شمع‌ها، نحوه انتقال نیرو و رفتار لرزه‌ای کل سیستم را دگرگون می‌سازد.

در حوزه شکنندگی و آسیب‌پذیری، چانگ و همکاران و حیدری و همکاران منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای را برای اسکله‌های پشتیبان شمع توسعه دادند و تأثیر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک و اندرکنش خاک-سازه بر عملکرد لرزه‌ای اسکله‌ها را بررسی کردند [۱۹ و ۲۰]. لی و همکاران با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-شمع، مدل‌های عددی برای ارزیابی شکنندگی ارائه کردند [۲۱]. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که طراحی‌های سنتی نمی‌توانند به‌طور کامل از آسیب‌پذیری اسکله‌ها در زلزله‌های شدید جلوگیری کنند. در زمینه مقاوم‌سازی، لوبدان و همکاران برنامه مقاوم‌سازی اسکله‌های آسیب‌دیده در زلزله لوماپریتا را توسعه داده و تأثیر روش‌های مختلف تقویت را بررسی کردند [۲۲]. کرمانی و همکاران نشان دادند که استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با فیبر کربن می‌تواند آسیب‌پذیری لرزه‌ای اسکله‌های خورده‌شده را کاهش دهد [۲۳]. به‌طور مشابه، فولتز و همکاران عملکرد اتصالات شمع-عرشه مقاوم‌سازی‌شده را در یک مدل مقیاس کامل آزمایش کرده و کارایی آن‌ها را در کاهش آسیب‌های لرزه‌ای تأیید کردند [۲۴]. از دیدگاه نوآوری، زنگ و همکاران با تحلیل آزمایشگاهی نشان دادند که افزایش مقاومت قاب‌های خمشی اسکله‌ها می‌تواند آسیب را کاهش دهد و عملکرد لرزه‌ای بهبود یابد [۲۵]. عمرانی و همکاران با استفاده از رویکرد کاهش ریسک، طراحی محافظه‌کارانه شمع‌های سکوه‌ای دریایی را بهینه‌سازی کردند [۲۶]. با وجود این تلاش‌ها، همچنان شکاف‌های مهمی در طراحی لرزه‌ای اسکله‌های شمع و عرشه وجود دارد. از طرف دیگر بررسی رفتار آزمایشگاهی اتصالات مورد واکاوی قرار نگرفته است.

۲-۱- ضرورت انجام تحقیق

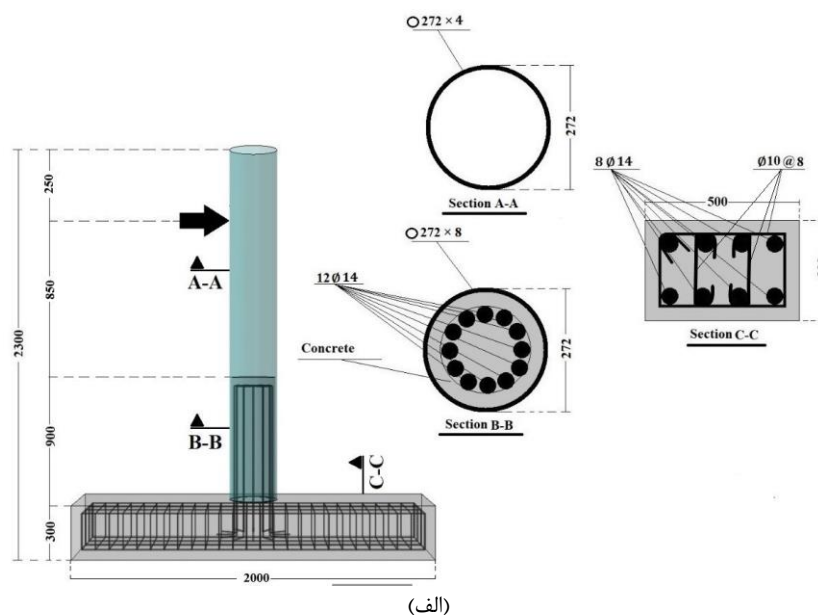
مطالعات پیشین عمدتاً بر تحلیل‌های عددی و مقاوم‌سازی‌های کلی متمرکز بوده‌اند، در حالی که توجه کمتری به بررسی دقیق رفتار اتصالات شمع به عرشه و توسعه طراحی‌های قابل‌تعمیر و مقرون‌به‌صرفه شده است. از طرف دیگر، در این حوزه با توجه به صعوبت‌های اجرایی و محدودیتهای موجود، اتصالاتی انتخاب می‌گردند که اجرا پذیر تر باشند. ارزیابی عملکرد این اتصالات در بارهای لرزه‌ای نیاز به تحقیق دارد. لذا هدف این تحقیق، بررسی رفتار لرزه‌ای و تحلیل آزمایشگاهی دو نوع رایج از سرشمع‌های اجرا شده در ایران است. این پژوهش به ارزیابی عملکرد این سرشمع‌ها در شرایط مختلف لرزه‌ای پرداخته و میزان آسیب‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی آن‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند به ارائه راهکارهای بهینه برای طراحی لرزه‌ای و بهبود مقاومت سرشمع‌ها، متناسب با شرایط ساختاری و لرزه‌ای کشور، کمک کند. این تحلیل‌ها گامی مهم در جهت ارتقای ایمنی و کاهش خسارات احتمالی ناشی از زلزله در زیرساخت‌های بندری ایران به‌شمار می‌آید.

۳- مشخصات مصالح و نمونه‌های مورد آزمایش

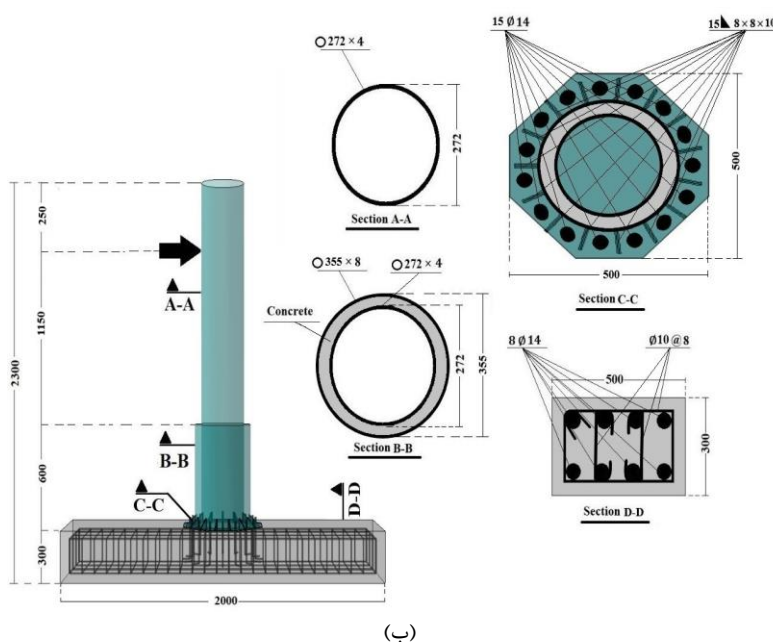
در این مطالعه دو نوع رایج از سرشمع‌های مورد استفاده در اسکله‌های ایران مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این اتصالات از یک اسکله‌ی طراحی و اجرا شده در خلیج فارس اقتباس شده است و نمونه‌ی عملی و اجرا شده می‌باشد. نمونه‌ها در آزمایش‌ها با مقیاس ۱/۳ ساخته شده‌اند. نمونه‌های مورد بررسی از سه بخش اصلی تشکیل شده است: یک شمع فولادی لوله‌ای با قطر ۲۷۲ میلیمتر و ضخامت دیواره ۴ میلی‌متر، یک سرشمع، و یک عرشه بتن مسلح با ابعاد ۳۰۰ میلیمتر در ۵۰۰ میلیمتر. نمونه PRC (میلگرد و بتن) که ترکیبی از میلگرد و بتن است که در آن شمع فولادی به وسیله میلگردهای طولی و بتن به عرشه متصل می‌شود. نمونه دو PEST (لوله فولادی خارجی) شمع فولادی به وسیله یک شمع فولادی بزرگتر که فاصله بین شمع و

و میلگردهای عرضی به قطر ۸ میلی‌متر که با فاصله ۷۵ میلی‌متر قرار گرفته‌اند، استفاده شده است. شکل ۱ شماتیکی از این پیکربندی‌ها را نشان می‌دهد.

سرشمع با گروت پر می‌شود به وسیله صفحه و میلگرد به عرشه متصل می‌شود. تیرهای عرشه مقیاس شده، از هشت میلگرد طولی به قطر ۱۴ میلی‌متر برای تحمل بارهای اصلی



(الف)



(ب)

شکل ۱- جزئیات نمونه‌های مورد آزمایش (الف) نمونه PRC (ب) PEST

ابعاد $2000 \times 500 \times 300$ میلی‌متر متصل شدند. عرشه باید به‌گونه‌ای طراحی شود که در مقایسه با ناحیه شمع فولادی، صلبیت بسیار بالاتری داشته باشد و به‌عنوان یک پایه پایدار، شمع‌ها را در طول بار گذاری لرزه‌ای به‌طور مؤثری مهار کند. این عرشه صلب شرایط واقعی را شبیه‌سازی می‌کند که در آن شمع‌های دریایی به یک

۳-۱- مواد و مصالح مصرفی

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، نمونه‌ها شامل دو شمع فولادی با مقاطع دایره‌ای بودند که هر یک دارای قطر ۲۷.۲ میلی‌متر و طول طره‌ای ۲۰۰۰ میلی‌متر ($L_s=2000$ mm) بودند. این نمونه‌ها، مطابق شکل‌های ۱ و ۲، در پایه خود به یک عرشه مستطیلی به

عرشه مستحکم برای مقاومت در برابر بارهای لرزه‌ای متصل می‌شوند.

۳-۲- مراحل ساخت نمونه ها

برای آماده‌سازی نمونه‌ها، یک سری مراحل سلسه وار به‌منظور حفظ یکنواختی و دقت سازه‌ای انجام شد. ابتدا میلگرد های طولی و عرضی مستقیماً روی قالب‌بندی ساخته شدند تا هم‌ترازی دقیق و یکنواختی میان نمونه‌ها تضمین شود. سپس کرنش سنج ها در مکان‌های کلیدی، به‌ویژه در نواحی که انتظار می‌رفت مفصل پلاستیک تشکیل شود، به میلگردهای طولی متصل شدند. این تنظیمات امکان ثبت داده‌های کرنش و تحلیل ویژگی‌های تغییر شکل تحت شرایط بارگذاری را فراهم کرد. در نمونه برای PRC برای اتصال شمع به عرشه از ۱۲ عدد میلگرد با قطر ۱۴ استفاده شد که تا ۸۵۰ میلیمتر درون شمع ادامه داشت. در نمونه PRC پس از سرهمبندی میلگرد هاع عرشه و اتصال لوله های فولادی به عرشه، بتن ریزی انجام شد. در نمونه PEST ابتدا عرشه اجرا شد بعد از قرارگیری میلگرد

و سرشمع که شامل ۱۵ عدد میلگرد سایز ۱۴ و یک صفحه به ضخامت ۱۰ میلیمتر که با ۱۵ عدد لچکی ۸×۱۰ به یک لوله با قطر ۳۵۵ میلیمتر جوش شده است، بتن ریزی عرشه انجام می‌شود سپس شمع داخل سرشمع گذاشته می‌شود و به فضای خالی دو لوله گروت تزریق شد. در فرآیند ساخت نمونه PEST، کلیه جوشکاری‌های اتصالات فولادی توسط نیروی متخصص و با رعایت دستورالعمل‌های استاندارد ملی ایران (ISIRI 288) و با استفاده از الکتروود E6013 صورت پذیرفت. پس از اتمام جوشکاری، تمامی اتصالات به‌صورت بصری مورد بازرسی قرار گرفت و هرگونه عیب سطحی احتمالی اصلاح شد. همچنین، ابعاد و کیفیت جوش‌ها با نقشه‌های اجرایی تطبیق داده شد و جهت اطمینان از کیفیت و استحکام اولیه، نمونه‌ها تحت بارگذاری مرده و ضربه کنترل گردیدند. لازم بذکر است اتصالات برش گیر بین شمع و لوله ی بزرگتر مطابق با جزئیات اصلی تعبیه گردید. این اتصالات برشی با جوش دادن میلگردهای اضافی به لوله‌های فولادی ایجاد شدند (شکل ۲).



(الف)



(ب)

شکل ۲- مراحل ساخت نمونه های مورد آزمایش (الف) نمونه PRC (ب) نمونه PEST

میلگردهای طولی استفاده شده در عرشه، شامل میلگردهای تغییرشکل‌یافته گرم‌نورد با گرید A3 و قطر ۱۴ میلی‌متر ($db=14\text{ mm}$) می باشد. برای تأیید خواص مکانیکی میلگردهای استفاده‌شده، آزمون‌های تک‌محوری انجام شد که در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳- آزمایش کشش میلگرد

خواص مواد فولادی استفاده‌شده در شمع‌ها و میلگردها در جدول ۱ ارائه شده برای اندازه‌گیری دقیق

خواص مکانیکی عناصر فولادی، آزمایش‌های کششی بر روی نمونه‌های فولادی طبق استاندارد ASTM-A370-14 انجام شد [۲۷]. مقاومت فشاری بتن با آزمایش سه نمونه مکعبی ۱۵۰ میلی‌متر در ۱۵۰ میلی‌متر پس از یک دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه در آب ارزیابی شد. در جدول ۲ مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و معادل استوانه‌ای آن‌ها مطابق استاندارد BS 1881: Part 120:1983 محاسبه شد که براساس آن، مقاومت استوانه‌ای تقریباً ۰/۸ برابر مقاومت مکعبی است [۲۸]. در نمونه PEST، از گروت با عملکرد بالا و بدون انقباض شامل سیمان، سنگدانه و مواد افزودنی استفاده شد. برای بررسی خواص مکانیکی گروت، منشورهای ۱۶۰×۴۰×۴۰ میلی‌متر ساخته شده و تحت آزمایش‌های فشاری مطابق با استاندارد GB/T 50448 قرار گرفتند. روانی گروت نیز مطابق استاندارد GB/T 2419 بررسی شد [۲۹]. جدول ۳ جزئیات مواد تشکیل‌دهنده گروت و جدول ۴ نتایج آزمایش‌ها مربوط به گروت را ارائه می‌دهد.

جدول ۱- میانگین خواص مکانیکی میلگردها طولی و عرض عرشه و شمع فولادی

نمونه	ضخامت (قطر) (mm)	(MPa) f_y	(MPa) f_u	(MPa) E
نمونه ۱	۱۴	۴۸۹	۶۵۱	۱/۹۷×۱۰.۵
نمونه ۲	۱۴	۴۸۷	۶۴۳	۱/۹۷×۱۰.۵
نمونه ۳	۱۴	۴۹۱	۶۴۶	۱/۹۷×۱۰.۵
L	۱۴	۴۸۹	۶۴۷	۱/۹۷×۱۰.۵
نمونه ۱	۱۰	۴۸۰	۶۲۲	۱/۹۷×۱۰.۵
نمونه ۲	۱۰	۴۷۸	۶۲۱	۱/۹۷×۱۰.۵
نمونه ۳	۱۰	۴۸۱	۶۲۲	۱/۹۷×۱۰.۵
T	۱۰	۴۸۰	۶۲۲	۱/۹۷×۱۰.۵
نمونه ۱	۸	۳۴۹	۴۹۰	۱/۹۷×۱۰.۵
نمونه ۲	۸	۳۴۰	۵۰۲	۱/۹۷×۱۰.۵
نمونه ۳	۸	۳۲۶	۴۸۱	۱/۹۷×۱۰.۵
S	۸	۳۳۸	۴۹۱	۱/۹۷×۱۰.۵
نمونه ۱	۴	۳۲۴	۴۷۸	۱/۹۷×۱۰.۵
نمونه ۲	۴	۳۳۰	۴۸۴	۱/۹۷×۱۰.۵
نمونه ۳	۴	۳۲۸	۴۸۲	۱/۹۷×۱۰.۵
S	۴	۳۲۷	۴۸۱	۱/۹۷×۱۰.۵

جدول ۲- نتایج آزمایشات بتن

نمونه	مقاومت فشاری نمونه مکعبی (MPa)	f'_c (MPa)	ϵ_{c0} (%)	ϵ_{cu} (%)	Weight (Kg)	Mass (kg/m^3)
نمونه ۱	۵۰/۴۲	۴۳/۱۴	۰/۲۳۰	۰/۳۸۶	۷/۲	۲۱۵۰
نمونه ۲	۵۱/۲۳	۴۴/۲۸	۰/۲۲۵	۰/۳۷۶	۷/۳	۲۱۶۰
نمونه ۳	۵۰/۹۵	۴۳/۸۶	۰/۲۴۱	۰/۴۰۱	۷/۲۵	۲۱۴۰
مقدار متوسط	۵۰/۸۶	۴۳/۳۴	۰/۲۳۲	۰/۳۸۸	۷/۲۵	۲۱۵۰
انحراف معیار	۰/۲	۰/۱۶	۰/۲۱۲	۰/۳۳۸	۷/۳	۲/۱۶۰

جدول ۳- نسبت ترکیب مواد گروت سیمانی

مواد	آب	سیمان پرتلند	شن ریز	سرباره فولادی	پودر خاکستر بادی	عامل کاهنده آب پلی کربوکسیلیک	منبسط کننده
نسبت ترکیب مواد (kg/m^3)	۳۹۳/۳	۹۱۰/۶	۷۲۹/۶	۴۸۲/۴	۲۱۷/۹	۴۷/۵	۱۵/۹

جدول ۴- نتایج آزمایشات گروت سیمان

نمونه	استحکام فشاری یک بعدی (MPa)	استحکام فشاری سه بعدی (MPa)	استحکام فشاری ۲۸ روزه (MPa)	سیالیت اولیه (mm)	سیالیت ۳۰ دقیقه‌ای (mm)	مدول الاستیسیته (MPa)
نمونه ۱	۲۸/۶۰	۳۹/۲۰	۵۷/۲۰	۳۱۹	۲۹۱	۳۵۷۸۰/۹۰
نمونه ۲	۳۱/۱۰	۴۴/۸۰	۵۹/۳۰	۳۱۹	۲۹۱	۳۶۳۲۱/۳۰
نمونه ۳	۳۵/۳۰	۴۶/۵۰	۶۴/۸۰	۳۱۹	۲۹۱	۳۶۲۵۹/۸۰
مقدار متوسط	۳۰/۷۰	۴۳/۵۰	۶۰/۴۰	۳۱۹	۲۹۱	۳۶۱۲۰/۷۰
انحراف معیار	۲/۷۶	۳/۱۲	۳/۲۰	صفر	صفر	۲۴۱/۵۶

۳-۳- چیدمان آزمایش و روش انجام آن

۳-۳-۱- ابزار دقیق و روش‌های آزمایش

نمونه‌ها در قاب اصلی مقاوم در آزمایشگاه قرار گرفته تا نیروها اعمال شده و شرایط مرزی تعیین شوند. تنظیمات دستگاه آزمایش در شکل ۴ (الف) نشان داده شده است. عرشه نمونه‌ها با استفاده از میلگردهای رزوه‌ای فولادی با مقاومت بالا به کف صلب آزمایشگاه متصل شد. یک جک هیدرولیکی ۳۰ تنی نیروهای چرخه‌ای را به عرشه شمع اعمال کرد که در شکل‌های ۲ و ۴ (الف) نمایش داده شده است. این جک افقی دارای یک حرکت کلی به طول ۱۵۰ میلی‌متر بود. برای اعمال نیرو محوری ثابت از یک جک هیدرولیکی ۵۰ تنی استفاده شد. هنگام محاسبه نیرو جانبی به عنوان تابعی از تغییر مکان جانبی، انحراف نیرو عمودی نیز لحاظ شد. برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های جانبی نمونه‌ها، از جابه‌جایی‌سنج‌های خطی (LVDT)

استفاده شد که قادر به ثبت تغییرات دقیق موقعیت هستند. جابجایی سنج ۱ در محل اعمال نیرو قرار گرفت تا جابه‌جایی جانبی (U_m) را ثبت کند (شکل ۴- الف). جابجایی سنج ۲ برای اندازه‌گیری جابه‌جایی جانبی (U_{hs}) ناشی از لغزش افقی تیر پایه استفاده شد. جابجایی سنج ۳ و جابجایی سنج ۴ برای ثبت جابه‌جایی جانبی ناشی از دوران تیر پایه (U_{ro}) نصب شدند. جابه‌جایی جانبی واقعی در نقطه بارگذاری با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد:

$$U = U_m - (U_{hs} + U_{ro}) \quad (1)$$

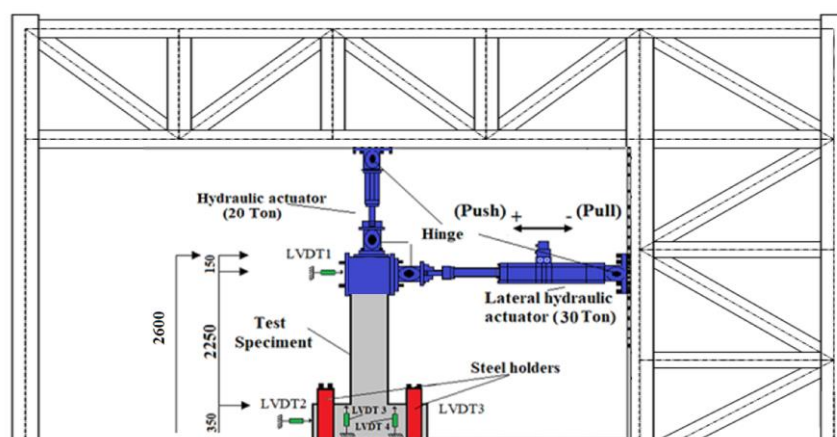
نیروی جانبی (V) با استفاده از حسگرهای نیروی تعبیه‌شده در جک هیدرولیکی اندازه‌گیری شد.

۳-۳-۲- دستورالعمل بارگذاری

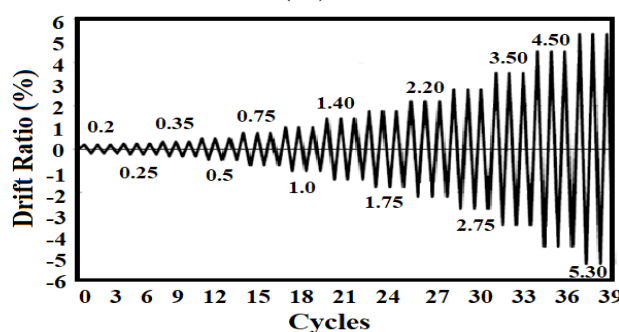
بارگذاری جانبی به صورت شبه‌استاتیکی رفت و برگشتی، مطابق با استاندارد [30] ACI 374.1-05 انجام شد (شکل ۴ (ب)). این بارگذاری به صورت کنترل

بنابراین، تغییر مکان نسبی ۰.۲ درصد (۲.۵ میلی‌متر) به‌عنوان دامنه اولین چرخه مطابق با توصیه‌های استاندارد ACI 374.1-05 تعیین شد. مطابق با استاندارد ACI 374.1-05، میزان افزایش تغییر مکان در چرخه‌های متوالی باید حداقل ۱.۲۵ برابر دامنه چرخه قبلی باشد و حداکثر از ۱.۵ برابر آن بیشتر نشود. چرخه‌ها در محدوده الاستیک باید به تعداد کافی برای امکان‌سنجی سختی سازه صورت پذیرد. در این تاریخچه بارگذاری، تغییر مکان جانبی به‌تدریج افزایش می‌یابد و باعث می‌شود نمونه تغییر شکل‌های بزرگی را در ناحیه غیرالاستیک تجربه کند. در هر سطح تغییر مکان، سه چرخه تکرار می‌شود و در مجموع ۱۳ سطح تغییر مکان جانبی به نمونه اعمال می‌شود.

تغییر مکان بوده و دامنه تغییر مکان جانبی در تاریخچه بارگذاری، به‌عنوان ضرایبی از نسبت تغییر مکان جانبی انتهای آزاد شمع به ارتفاع شمع، تنظیم می‌شود و نسبت دریافت را نیز در بر می‌گیرد. در تعریف تاریخچه بارگذاری، دو پارامتر اساسی وجود دارد: نخست میزان افزایش تغییر مکان و دوم تعداد تکرار در هر سطح تغییر مکان. بر اساس این روش، تغییر مکان نسبی باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که علاوه بر امکان ارزیابی رفتار کلی نمونه، امکان سنجش سطوح مختلف عملکرد آن نیز فراهم باشد. این سطوح عملکرد شامل قابلیت استفاده، آستانه گسیختگی و ایمنی اجزای سازه‌ای هستند که پس از انجام آزمایش قابل ارزیابی خواهند بود. اولین دامنه تغییر مکان اعمالی باید به‌گونه‌ای انتخاب گردد که نمونه رفتار الاستیک از خود نشان دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۴- الف) تنظیمات دستگاه آزمایشگاهی. ب) پروتکل بار گذاری به صورت جابجایی کنترل [30]

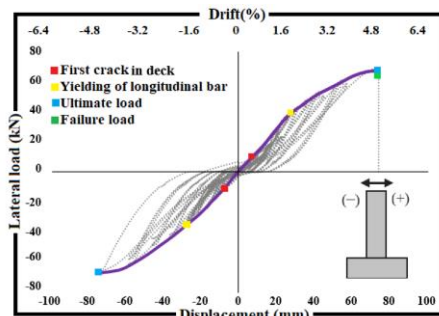
۴- بحث و بررسی نتایج

در این بخش، نمودارهای چرخه‌ای نیرو-جابجایی برای نمونه‌های آزمایش شده PRC و PEST تحلیل شده‌اند تا ظرفیت جذب انرژی، تغییر شکل پلاستیک و رفتار کلی سازه تحت نیروهای چرخه‌ای بررسی گردد (شکل ۵). هر

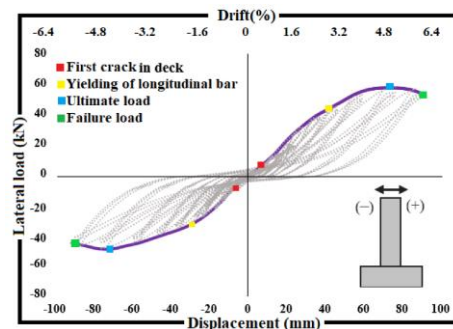
۴-۱- رفتار چرخه‌ای نیرو-جابجایی شمع‌ها

جدول عبارتند از: نیرو مربوط به اولین ترک بتن در عرشه (V_{cr})، جابجایی مربوط به اولین ترک بتن در عرشه (Δ_{cr})، نیرو مربوط به تسلیم میلگرد (V_y)، جابجایی مربوط به تسلیم میلگرد (Δ_y)، نیرو نهایی نمونه‌ها (V_u)، جابجایی نهایی نمونه‌ها (Δ_u)، نیرو شکست نمونه‌ها (V_{fr}) و جابجایی شکست نمونه‌ها (Δ_{fr})، این متغیرها به تحلیل دقیق‌تر رفتار هر نمونه و ارزیابی ظرفیت‌های مختلف سازه تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای کمک می‌کنند.

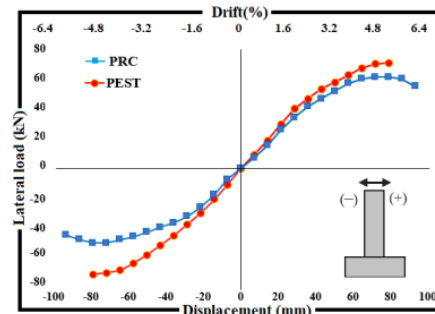
دو نمونه پس از نمایش رفتار الاستیک اولیه، وارد مرحله تغییر شکل پلاستیک شده و سپس کاهش سختی را تجربه کردند که نشان‌دهنده تبدیل انرژی و جذب نیرو در مراحل مختلف بارگذاری است. در این فرآیند، کاهش ظرفیت باربری و سختی به دلیل آسیب‌های تدریجی ناشی از بارگذاری چرخه‌ای مشاهده شد. در جدول ۵ نتایج آزمایشگاهی برای نمونه‌های PRC و PEST آورده شده است. این جدول شامل متغیرهای مختلفی است که به تحلیل رفتار شمع‌ها کمک می‌کنند. متغیرهای موجود در



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۵- نمودارهای نیرو - جابه‌جایی (دریافت برای نمونه‌ها: الف) PRC، ب) PEST، ج) نمودار مقایسه نمونه‌ها

جدول ۵- مقایسه مقادیر مربوط به رفتار چرخه‌ای نیرو- جابه‌جایی

نمونه	ناحیه	V_{cr} (kN)	Δ_{cr} (mm)	V_y (kN)	Δ_y (mm)	V_u (kN)	Δ_u (mm)	V_{fr} (kN)	Δ_{fr} (mm)
PRC	مثبت	۷	۷	۴۵	۴۲	۵۹	۷۷	۵۳	۹۱
	منفی	-۷	-۷	-۳۱	-۲۸	-۴۸	-۷۰	۴۳	-۹۱
	میانگین	۷	۷	۳۸	۳۵	۵۳/۵	۷۳/۵	۴۸	۹۱
PEST	مثبت	۹	۷	۴۵	۳۵	۶۸/۴	۷۷	۶۱/۵۶	۷۷
	منفی	-۱۰/۸	-۷	-۴۳/۲	۳۵	-۶۸	-۷۷	-	-
	میانگین	۹/۹	۷	۴۴/۱	-۳۵	۶۸/۲	۷۷	-	-

در نمونه PRC، که ترکیبی از شمع فولادی، میلگردهای طولی و بتن مسلح است، ابتدا رفتار الاستیک مشاهده شد و پس از آن، مساحت زیر هر حلقه چرخه‌ای به‌طور تدریجی افزایش یافت، که نشان‌دهنده جذب انرژی بیشتر و تغییرات پلاستیک در سازه بود. این رفتار تدریجی، که به دلیل گسترش تغییر شکل پلاستیک است، با کاهش ظرفیت باربری در جابجایی‌های بزرگ‌تر همراه بود. در این نمونه، علیرغم ظرفیت جذب انرژی بالا، ترک‌ها و آسیب‌ها در عرشه به جای شمع مشاهده شد، که به‌طور غیرمنتظره‌ای ترک‌ها و آسیب‌های جدی در عرشه ایجاد شدند. این مسأله نشان‌دهنده یک نقطه ضعف اساسی در طراحی لرزه‌ای است، زیرا در سازه‌های مشابه مانند پل‌ها و اسکله‌ها، ترک و آسیب باید در شمع‌ها ایجاد شوند تا از یکپارچگی عرشه جلوگیری شود. در نمونه PEST، که شامل لوله فولادی بیرونی و گروت پرکننده است، رفتار مشابهی با نمونه PRC مشاهده شد، با این تفاوت که ظرفیت باربری اوج این نمونه ۶۸/۲۰ کیلو نیوتن بود که بیشتر از نمونه PRC بود، اما در عوض جابجایی حداکثر کمتری معادل ۷۷ میلی‌متر نشان داد. در این نمونه نیز شکست در محل اتصال میلگرد و صفحه فولادی مشاهده شد، که در نهایت منجر به عدم کارکرد مناسب نمونه تحت نیروهای چرخه‌ای گردید. مقایسه این دو نمونه نشان می‌دهد که اگرچه نمونه PEST در ظرفیت باربری اولیه عملکرد بهتری از خود نشان داد، اما نمونه PRC به دلیل ظرفیت بالاتر جذب انرژی، تحت بارگذاری چرخه‌ای توانست انرژی بیشتری را در مراحل مختلف جذب کند. از سوی دیگر، مشکلات مشابه در هر دو نمونه مبنی بر تشکیل ترک‌ها و آسیب‌ها در عرشه به جای شمع وجود داشت، که به وضوح نشان‌دهنده ضعف‌های طراحی در مکانیزم‌های شکست است. در نمونه PRC بخش بتنی محصور در شمع رفتار نسبتاً مناسبی نشان داد و حرکت‌های قابل تعمقی بین این دو المان مشاهده نگردید. در مراحل انتهایی بارگذاری، مقدار ناچیزی لغزش مشاهده گردید. این مشکلات نیازمند اصلاح طراحی، به‌ویژه در جزئیات اتصال

و پیکربندی‌های مواد هستند تا ترک‌ها و آسیب‌ها به درستی در شمع‌ها ایجاد شوند. به‌طور کلی، تحلیل نمودارهای چرخه‌ای نیرو-جابجایی در نمونه‌های PRC و PEST نشان‌دهنده نقاط قوت و ضعف در هر دو طراحی است. در حالی که هر دو نمونه توانایی بالایی در جذب انرژی دارند، ترک‌ها و آسیب‌های ایجاد شده در عرشه به جای شمع نیاز به اصلاحات اساسی در طراحی برای بهبود عملکرد کلی سازه دارند. برای دستیابی به نتایج بهینه در برابر نیروی چرخه‌ای، به‌ویژه در سازه‌های دریایی و پل‌ها، باید طراحی‌ها به‌گونه‌ای تغییر کنند که تغییر شکل پلاستیک به‌طور مناسب در شمع‌ها ایجاد شود و عرشه‌ها از آسیب و ترک‌خوردگی‌های ناشی از این تغییرات در امان بمانند.

لازم به ذکر است که در نمونه PRC، برخلاف انتظار، ترک‌ها و آسیب‌ها عمدتاً در ناحیه عرشه مشاهده گردید. این مسئله ناشی از سختی نسبی بالای عرشه، نحوه امتداد و مهار میلگردها و عدم پیش‌بینی محل ضعف کنترل‌شده در پای شمع است. این موضوع از منظر طراحی لرزه‌ای مطلوب نبوده و نشان می‌دهد برای هدایت تمرکز خرابی به سرشمع، لازم است در جزئیات اتصال، محل ایجاد مفصل پلاستیک به‌طور هدفمند در پای شمع پیش‌بینی شود. در طرح‌های آتی می‌توان با کاهش آرماتور، مهار عرضی یا استفاده از تکنیک‌های ویژه در پای شمع، از آسیب به عرشه جلوگیری کرد و عملکرد لرزه‌ای مطلوب‌تری حاصل نمود. از منظر تحلیلی، مقایسه ظرفیت خمشی مقطع عرشه و پای شمع نشان می‌دهد که در این نمونه، به دلیل وجود آرماتورهای اتصال و نحوه قرارگیری میلگردها، ظرفیت خمشی مؤثر عرشه در محل اتصال نسبت به ظرفیت خمشی پای شمع کمتر بوده است. بنابراین مطابق اصول طراحی لرزه‌ای اعضای بتن‌آرمه، محل تمرکز لنگر و تشکیل ترک خمشی اولیه در بخش عرشه اتفاق افتاده است. علاوه بر این، عدم تضعیف هدفمند یا کاهش آرماتور در پای شمع موجب شده است که ناحیه ضعیف‌تر (عرشه) محل آغاز و توسعه آسیب قرار گیرد. در نتیجه، رفتار مشاهده‌شده به

شعاعی در اطراف شمع ها و سپس تسلیم میلگردها در ناحیه اتصال شمع به عرشه همراه بود. در ابتدا، ترک‌های خمشی در بخش پایین شمع و در ناحیه عرشه در مرحله بارگذاری اولیه مشاهده شدند، که مطابق با شکل ۶ است. اولین ترک خمشی در نمونه‌های PRC و PEST به ترتیب تحت نیروهای ۷ کیلونیوتن ($\Delta = 4$ میلی‌متر) و ۱۰ کیلونیوتن ($\Delta = 4$ میلی‌متر) در محل اتصال شمع - عرشه رخ داد. با افزایش بار، ترک‌های خمشی در نمونه‌های PRC و PEST به ترتیب تحت نیروهای ۳۳، ۴۰، ۴۶، ۵۰ و ۵۹ کیلونیوتن برای نمونه PRC و ۳۲، ۴۳، ۵۰، ۵۷، ۶۲ و ۷۶ کیلونیوتن برای نمونه PEST در بخش عرشه گسترش یافتند. در مورد ترک‌های برشی، در نمونه‌های PRC و PEST به ترتیب ترک‌های برشی تحت نیروهای ۳۳، ۴۰ و ۴۵ کیلونیوتن آغاز شدند.

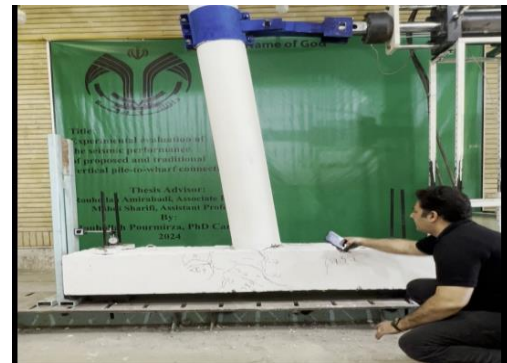


(الف)

لحاظ تحلیلی و بر اساس تعادل ظرفیت خمشی اجزا قابل تبیین است و در پژوهش‌های مشابه نیز به عنوان یک ضعف طراحی گزارش شده است [۳۳]. بنابراین، برای هدایت صحیح مفصل پلاستیک و تمرکز خرابی به ناحیه پای شمع، لازم است جزئیات اتصال به گونه‌ای طراحی شود که ظرفیت خمشی عرشه بیشتر از پای شمع باشد و همچنین محل ضعف کنترل شده به صورت هدفمند در سرشمع پیش‌بینی گردد.

۴-۲- تجزیه و تحلیل حالت ترک و شکست بتن

با توجه به نتایج آزمایش‌های، نمونه‌های PRC و PEST هر دو یک مکانیسم شکست خمشی مشابه را از خود نشان دادند که بطور کلی با ایجاد ترک خمشی در پوشش بتنی و گسترش ترک‌های بیشتر و وقوع ترک‌های



(ب)

شکل ۶- الگوهای ترک و انتشار آسیب نمونه‌های (الف) نمونه PRC. (ب) نمونه PHST.

۴۴/۱ کیلونیوتن ($\Delta = 35$ میلی‌متر) به تسلیم رسیدند. نهایتاً، نمونه‌های PRC و PEST تحت بارهای ۵۳

میلگردهای طولی در نمونه‌های PRC و PEST به ترتیب تحت بارهای ۳۸ کیلونیوتن ($\Delta = 35$ میلی‌متر) و

کیلونیوتن ($\Delta = 91$ میلی‌متر) و 56.61 کیلونیوتن ($\Delta = 77$ میلی‌متر) شکست خوردند. در نمونه PRC، شکست به‌طور عمده در ناحیه اتصال شمع به عرشه و در اثر ترک‌خوردن پوشش بتنی و تسلیم میلگردها رخ داد. در حالی که در نمونه PEST، شکست قبل از رسیدن به حداکثر مقاومت خمشی خود در ناحیه جوشکاری شده در محل اتصال صفحه شمع به بولت عرشه رخ داد. بررسی جزئیات اجرایی این اتصال نشان می‌دهد که محدودیت طول مؤثر ناحیه جوش میلگرد به صفحه فولادی عامل اصلی تمرکز تنش و بروز شکست زودهنگام در این نقطه بوده است؛ به‌گونه‌ای که به دلیل کم بودن طول جوش، ظرفیت انتقال نیرو کاهش یافته و این ناحیه به عنوان محل ضعف سازه‌ای عمل کرده است. بنابراین، در طراحی آینده، افزایش طول جوش و اصلاح جزئیات اجرایی می‌تواند به بهبود ظرفیت و دوام این نوع اتصال کمک کند. در گروت استفاده شده در نمونه PEST صدای خوردشدگی و ترکهای ریز مشاهده شد. این نتایج نشان‌دهنده تأثیرات شرایط بارگذاری و نوع ساختار اتصال در نحوه شکست نمونه‌ها هستند. به‌ویژه، در نمونه PEST که پیش از رسیدن به ظرفیت نهایی خمشی خود دچار شکست شد، به نظر می‌رسد که جوشکاری‌های محل اتصال صفحه شمع به بولت عرشه به‌طور مستقیم بر رفتار شکست تأثیر گذاشته است. مقایسه الگوی شکست مشاهده‌شده با انتظار مبتنی بر جزئیات طراحی نشان می‌دهد که در هر دو نمونه PRC و PEST، علی‌رغم انتظار اولیه بر اساس مبانی طراحی لرزه‌ای (متمرکز شدن خرابی در پای شمع)، عمده ترک‌ها و شکست‌ها در ناحیه عرشه (نمونه PRC) یا محل جوش اتصال (نمونه PEST) رخ داده است. این رفتار عمدتاً ناشی از ضعف نسبی ظرفیت خمشی و جزئیات اجرایی اتصال در این بخش‌ها بوده است؛ به طوری که محل ضعیف‌تر سازه‌ای، محل تمرکز تنش و شروع شکست شده است. به طور خاص، در نمونه PRC عدم ایجاد ضعف هدفمند در پای شمع و در نمونه PEST ضعف در ناحیه جوشکاری، عامل اصلی این الگو بوده است. این یافته‌ها ضرورت بازنگری

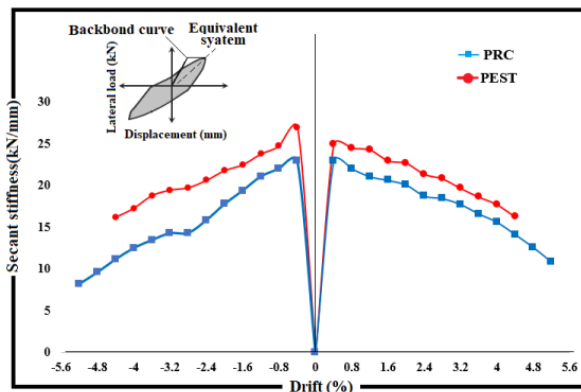
در طراحی جزئیات اتصال به‌منظور هدایت مطلوب شکست و حفظ یکپارچگی سازه را تأکید می‌کند

۴-۳- تحلیل سختی و تری

شکل ۷ نشان می‌دهد که چگونه سختی و تری نمونه‌های آزمایشی در طول آزمایش‌های بارگذاری چرخه‌ای مطابق با جابه‌جایی تغییر کرده است. در این نوع آزمایشات، هرچه بارگذاری چرخه‌ای بیشتر می‌شود، معمولاً سختی نمونه‌ها کاهش می‌یابد، زیرا تغییرات پلاستیک در سازه رخ می‌دهد که باعث کاهش ظرفیت باربری و تغییر شکل‌های دائمی در مصالح می‌شود. در این آزمایشات، هر دو نمونه PRC و PEST کاهش سختی مشابهی را تجربه کردند، که به‌ویژه ناشی از ترک‌خوردگی خمشی در طول آزمایش‌ها بوده است. این ترک‌ها باعث ایجاد تغییر شکل‌های دائمی و کاهش استحکام مواد در محل ترک‌ها شدند، به‌ویژه در نواحی اتصال شمع به عرشه، جایی که بارگذاری بیشتری اعمال می‌شد. در مقایسه با هم، نمونه PRC سختی کمتری داشت. در این نمونه که ترکیبی از شمع فولادی و میلگردهای طولی است، به دلیل استفاده از بتن و میلگرد، سختی نسبی آن در برابر بارگذاری چرخه‌ای پایین‌تر بود. به‌ویژه پس از ایجاد ترک‌های خمشی و شروع تغییر شکل پلاستیک، ظرفیت جذب انرژی در این نمونه کاهش یافت و باعث کاهش سختی شدید در نمونه PRC شد. در مقابل، نمونه PEST که از لوله‌های فولادی بیرونی و گروت برای تقویت استفاده کرده است، عملکرد بهتری از نظر سختی داشت. استفاده از لوله‌های فولادی و گروت باعث افزایش سختی این نمونه تا حدود ۱۵ درصد نسبت به نمونه PRC شد. این افزایش به دلیل ماهیت محکم‌تر لوله‌های فولادی و توانایی گروت در بهبود مقاومت سازه در برابر تغییر شکل‌های خمشی و کششی بود. با این حال، هر دو نمونه به دلیل اتصال نامناسب در ناحیه عرشه، شاهد کاهش مداوم سختی بودند. این به‌ویژه در نمونه PRC مشهود بود، جایی که شکست جوش در ناحیه اتصال شمع به عرشه باعث کاهش ناگهانی و چشم‌گیر سختی در کل

کلی سازه در برابر بارهای چرخه‌ای داشته باشند. این تحلیل نشان می‌دهد که استفاده از مواد مقاوم‌تر مانند لوله‌های فولادی و گروت می‌تواند باعث بهبود سختی و مقاومت سازه تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای شود، اما توجه به جزئیات طراحی و اتصالات نیز حیاتی است تا از کاهش ناگهانی سختی و کاهش عملکرد جلوگیری شود.

سیستم شد. در این نمونه، جوش‌های ضعیف باعث ترک‌خوردگی در نواحی کلیدی شدند که در نتیجه سختی سیستم را از بین برد. در نهایت، بررسی نتایج نشان می‌دهد که در طراحی‌های مشابه، باید به مسئله اتصالات و نحوه تعامل اجزا در سازه توجه بیشتری شود، چرا که مشکلات در اتصالات می‌توانند تأثیر قابل‌توجهی بر سختی و عملکرد



شکل ۷- سختی محاسبه شده برای نمونه‌های PRC و PEST

است. علاوه بر این، زاویه انحنا تسلیم و زاویه انحنا نهایی در این دو نمونه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. مقدار نیرو محوری نیز تأثیر مستقیمی بر ظرفیت دوران نهایی θ_u دارد. با افزایش دوران اعمالی، کاهش در لنگر نهایی و افزایش زوال پس از پیک مشاهده می‌شود. این امر نشان‌دهنده حساسیت سیستم به بارهای بزرگ و تغییرات در زاویه انحنا است. به‌طور خاص، تحلیل نسبت شکل‌پذیری دوران ($\mu = \theta_y / \theta_u$) که بیانگر میزان قابلیت تغییر شکل سازه است، تفاوت اندکی بین نمونه‌های PRC و PEST نشان می‌دهد. بر اساس محاسبات انرژی میانگین لنگر-دوران آزمایشی و معادل‌سازی آن با لنگر-دوران دوطبقی، تنها ۱۵ درصد تفاوت در ظرفیت دوران و لنگر نهایی بین این دو نمونه مشاهده می‌شود. نتایج این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که اگرچه ظرفیت لنگر نهایی نمونه PEST بالاتر از PRC است، اما تفاوت‌های قابل توجهی در عملکرد دوران و شکل‌پذیری این دو نمونه وجود ندارد. این امر ممکن است به دلیل ویژگی‌های خاص طراحی و جوشکاری در محل اتصال صفحه شمع به بولت عرشه در

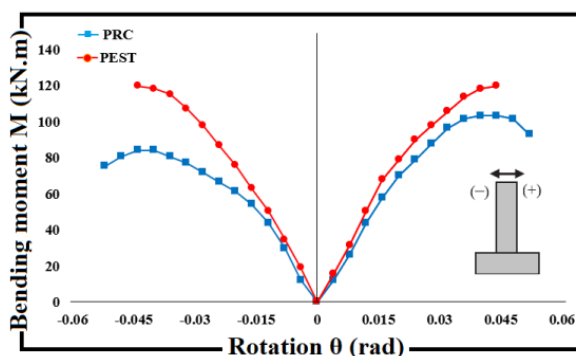
۴-۴- نمودار لنگر-دوران

در تحلیل نمودار لنگر-دوران (شکل ۸) برای نمونه‌های PRC و PEST، رفتار سازه تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای بررسی شده است. نمودارهای لنگر-دوران برای هر نمونه، تغییرات در سختی سیستم را با توجه به دوران نهایی θ_u (معادل ۱۰٪ کاهش در لنگر نهایی M_u) نشان می‌دهد. به‌طور کلی، این نمودارها به تحلیل ظرفیت سازه‌ها تحت بارهای چرخه‌ای و بررسی عملکرد آن‌ها در مراحل مختلف بارگذاری کمک می‌کند.

بر اساس داده‌های جدول ۶ متغیرهای کلیدی مانند لنگر تسلیم (M_y)، زاویه انحنا تسلیم (θ_y)، لنگر نهایی (M_u) و زاویه انحنا نهایی (θ_u) برای نمونه‌های PRC و PEST استخراج شده است. این متغیرها امکان تحلیل دقیق رفتار شمع‌ها و ظرفیت‌های سازه‌ای تحت بارهای چرخه‌ای را فراهم می‌آورد. همانطور که در نمودارهای لنگر-دوران مشخص است، نمونه PEST دارای لنگر نهایی بالاتری نسبت به نمونه PRC است که این امر نشان‌دهنده ظرفیت بالاتر نمونه PEST در تحمل بارهای چرخه‌ای

باشند. در نهایت، تحلیل دقیق این پارامترها می‌تواند به مهندسان کمک کند تا به انتخاب بهینه‌تری در طراحی و ارزیابی عملکرد سازه‌ها تحت بارهای چرخه‌ای برسند.

نمونه PEST باشد که موجب افزایش ظرفیت باربری آن در مقایسه با نمونه PRC می‌شود. این یافته‌ها می‌توانند در بهبود طراحی سازه‌ها و شمع‌ها تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای و ارزیابی ظرفیت‌های مختلف آن‌ها کاربرد داشته



شکل ۸- پوش دسته نمودار، نمودار لنگر-دوران برای نمونه های PRC و PEST

جدول ۶- مقایسه مقادیر مربوط به رفتار چرخه ای لنگر- انحنا

نمونه	ناحیه	M_{cr} (kN)	θ_{cr} (mm)	M_y (kN)	θ_y (mm)	M_u (kN)	θ_u (mm)	M_{fr} (kN)	θ_{fr} (mm)
PRC	مثبت	۱۲/۲۵	۰/۰۰۴	۷۸/۷۵	۰/۰۲۴	۱۰۳/۲۵	۰/۰۴۴	۹۲/۷۵	۰/۰۵۲
	منفی	-۱۲/۲۵	-۰/۰۰۴	-۵۴/۲۵	-۰/۰۱۶	-۸۴/۰۰	-۰/۰۴۰	۷۵/۲۵	-۰/۰۵۲
	میانگین	۱۲/۲۵	۰/۰۰۴	۶۶/۵۰	۰/۰۲۰	۹۳/۶۳	۰/۰۴۲	۸۴/۰۰	۰/۰۵۲
PEST	مثبت	۱۵/۷۵	۰/۰۰۴	۷۸/۷۵	۰/۰۲۰	۱۱۹/۷۰	۰/۰۴۴	۱۰۷/۷۳	۰/۰۴۴
	منفی	-۱۸/۹۰	-۰/۰۰۴	-۷۵/۶۰	-۰/۰۲۰	-۱۱۹/۷۰	-۰/۰۴۴	-	-
	میانگین	۱۷/۳۳	۰/۰۰۴	۷۷/۱۸	۰/۰۲۰	۱۱۹/۷۰	۰/۰۴۴	-	-

افزایش یافته بود. پس از سی و سومین چرخه بارگذاری، انرژی تلف شده نمونه های PEST بعلت پارگی جوش صفر می گردد. در مقایسه دونمونه ، نمونه PRC سطوح قابل توجهی از اتلاف انرژی را نشان می دهد. میرایی هیستریزس معادل به صورت معادله (۲) تعریف می شود:

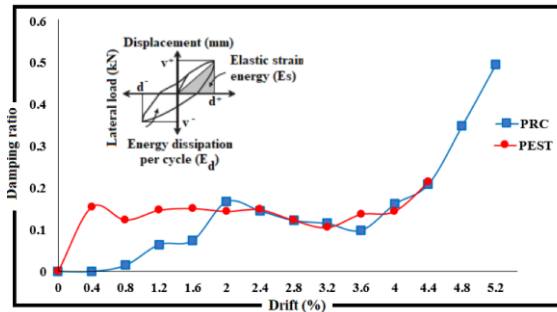
$$\xi = \frac{E_d}{4\pi E_s} \quad (1)$$

جایی که E_s انرژی کرنش الاستیک و E_d انرژی تلف شده در طول یک چرخه بارگذاری است. نتایج نسبت‌های میرایی نمونه های آزمایش با توجه به دریافت در شکل ۹- ب نشان داده شده است. نسبت‌های میرایی نمونه های PRC و PEST ابتدا در ۰/۱۸ یا نزدیک به آن نوسان داشتند، سپس تا حدودی در ۰/۱۴ با دریافت ۲/۴ درصد کاهش یافتند.

۴-۵- ظرفیت‌های انرژی تلف شده و میرایی چرخه‌ای معادل

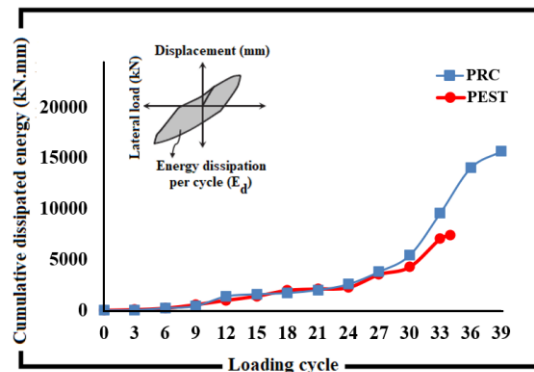
یکی از مهم‌ترین عوامل در تعیین میزان عملکرد یک جزء تحت بارگذاری لرزه‌ای شبیه‌سازی شده، توانایی آن در اتلاف انرژی است [۳۱ و ۵]. شکل ۹- الف ظرفیت اتلاف انرژی نمونه های آزمایشی را نشان می دهد. برای محاسبه انرژی تلف شده نمونه های آزمایشی مطابق با توصیه های ASCE 4113 از سطح زیرحلقه، برای هر چرخه بارگذاری استفاده شد [۳۲]. انرژی تلف شده نمونه ها، PRC و PEST، تقریباً برابر تا سیکل ۲۴ بارگذاری باهم برابر بود، همانطور که در شکل (۴-۱۲) نشان داده شده است. در سی و سومین چرخه بارگذاری، انرژی تلف شده نمونه های PRC و PEST به ترتیب ۹۵۵۶ و ۷۰۷۸ (kN.mm)

نمونه PEST به تدریج تا ۰/۲۱ افزایش یافت که نشان‌دهنده یک دریفت ۴/۴ درصدی است.



(ب)

نسبت میرایی نمونه PRC به تدریج تا ۰/۴۹ افزایش یافت که نشان‌دهنده یک دریفت ۵/۲ درصدی است. میرایی



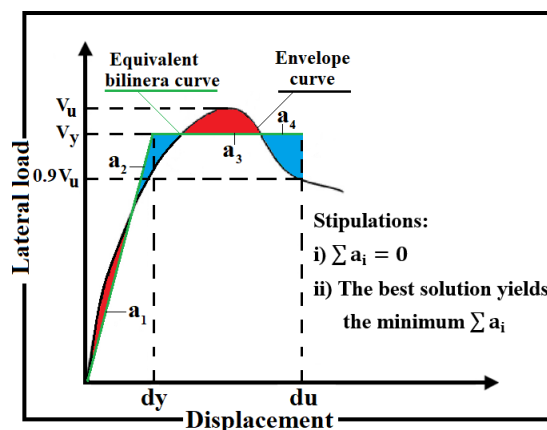
(الف)

شکل ۹- (الف) ظرفیت اتلاف انرژی و (ب) نسبت‌های میرایی محاسبه شده برای نمونه‌های PRC و PEST

به‌منظور محاسبه شاخص شکل‌پذیری، میانگین مقادیر شکل‌پذیری-جابه‌جایی برای جابه‌جایی‌های مثبت و منفی محاسبه گردید. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، نسبت به تحقیقات پیشین میزان شکل‌پذیری نمونه‌ها در این مطالعه به‌طور نسبی کمتر مشاهده شد [۳۳، ۳۴]. این کاهش در شکل‌پذیری به‌ویژه در ناحیه عرشه مشهود است، جایی که ترک‌های بیشتری نسبت به سایر نقاط در هر دو نمونه PRC و PEST مشاهده گردید. این امر می‌تواند به عواملی چون نوع اتصال‌ها، ویژگی‌های ساختاری و نوع بارگذاری در طول آزمایش‌ها نسبت داده شود.

۴-۶ - شکل‌پذیری - جابه‌جایی

شکل ۱۰ نمودار دوخطی ایده‌آلی را ارائه می‌دهد که برای مقایسه و ارزیابی نسبت شکل‌پذیری بین نمونه‌های آزمایشی استفاده می‌شود. در جدول ۷، مقادیر μ_{Δ}^{PRC} و μ_{Δ}^{PEST} به ترتیب نشان‌دهنده شکل‌پذیری برای نمونه‌های PRC و PEST تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای هستند. همچنین مقادیر تسلیم و جابه‌جایی‌های نهایی برای محاسبه شکل‌پذیری-جابه‌جایی با شاخص‌های مربوط به نیروهای مثبت و منفی در جدول ۷ آورده شده است.



شکل ۱۰- تصویر گرافیکی از تعریف نمودار دوخطی مربوطه به‌منظور محاسبه شاخص شکل‌پذیری - جابه‌جایی [۵]

جدول ۷- داده‌ها برای ارزیابی ضریب شکل‌پذیری جابه‌جایی

نمونه	ناحیه	Δy (mm)	Δf_r (mm)	μ_Δ	$\left(\frac{\mu_\Delta^{PRC} - \mu_\Delta^{PECT}}{\mu_\Delta^{PRC}} \times 100 \right)$
PRC	مثبت	۴۲	۹۱	۲/۶	-
	منفی	-۲۸	-۹۱		
	میانگین	۳۵	۹۱		
PEST	مثبت	۳۵	۷۷	۲/۲	-۱۵٪
	منفی	۳۵	-		
	میانگین	-۳۵	-		

جدول ۸- مقایسه خلاصه ویژگی‌ها و رفتار لرزه‌ای نمونه‌های PRC و PEST

ویژگی/رفتار	نمونه PRC	نمونه PEST
نوع اتصال	میلگرد طولی و بتن (اتصال مستقیم)	لوله فولادی خارجی و گروت + صفحه فولادی
نحوه انتقال نیرو	میلگرد داخل شمع و عرشه	لوله فولادی و گروت بین شمع و عرشه
سختی اولیه	کمتر	حدود ۱۵٪ بیشتر نسبت به PRC
شکل‌پذیری نهایی	متوسط	تقریباً مشابه PRC؛ محدود شده توسط جوشکاری
ظرفیت جذب انرژی	بالاتر در دررفت‌های زیاد	کمتر از PRC
محل تمرکز خرابی	عرشه و پوشش بتنی عرشه	ناحیه جوش صفحه فولادی به عرشه
الگوی ترک/شکست	ترک خمشی در عرشه و تسلیم میلگردها	شکست موضعی در محل جوشکاری، ترک ریز در گروت
مزیت اصلی	جذب انرژی بالا؛ ساده‌تر برای تعمیر	سختی بیشتر؛ اجرای صنعتی‌تر
ضعف اصلی	آسیب به عرشه؛ نیاز به اصلاح جزئیات اتصال	ضعف در جوشکاری؛ محدودیت در شکل‌پذیری

به‌طور خاص، مشاهده می‌شود که با وجود ترک‌های ایجاد شده در عرشه، شکل‌پذیری نمونه‌ها در مقایسه با تحقیقات مشابه گذشته کاهش قابل توجهی داشته است [۹، ۳۳ و ۳۴]. به منظور شفاف‌سازی و جمع‌بندی ویژگی‌ها و رفتارهای مشاهده شده در دو نمونه مورد مطالعه، جدول ۸ مقایسه‌ای خلاصه از مشخصات هندسی، اجرایی و عملکرد لرزه‌ای نمونه‌های PRC و PEST ارائه می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش رفتار لرزه‌ای و ظرفیت انرژی دو نوع اتصال رایج شمع به عرشه (PRC و PEST) در مقیاس آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه‌ای بررسی شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد نمونه PEST با ظرفیت باربری نهایی ۵۶.۶ کیلونیوتن نسبت به PRC با ۵۳.۰ کیلونیوتن حدود ۷ درصد ظرفیت بیشتری دارد و سختی اولیه آن نیز تقریباً ۱۵ درصد بالاتر است. با این حال، شاخص شکل‌پذیری جابجایی در نمونه PRC معادل ۲.۶ و برای نمونه PEST

برابر با ۲.۲ به دست آمد که نشان‌دهنده عملکرد شکل‌پذیرتر نمونه PRC در برابر بارگذاری‌های شدید است. تحلیل مساحت حلقه‌های هیستریزس نیز بیانگر آن است که ظرفیت جذب انرژی نمونه PRC نسبت به PEST حدود ۱۲ درصد بیشتر بوده و در سی و سومین چرخه بارگذاری، انرژی تلف شده در PRC به ۹۵۵۶ kN.mm و در PEST به ۷۰۷۸ kN.mm رسید. همچنین، میرایی هیستریزس معادل در نمونه PRC تا ۰.۴۹ (در دررفت ۲.۵٪) و در نمونه PEST تا ۰.۲۱ (در دررفت ۴.۴٪) افزایش یافت که نمایانگر عملکرد بهتر نمونه PRC در جذب و مستهلک‌سازی انرژی است. از نظر الگوی شکست، نمونه PRC عمدتاً دچار تسلیم میلگردها و ترک‌خوردگی پوشش بتنی در عرشه شد، اما در نمونه PEST شکست قبل از رسیدن به ظرفیت خمشی نهایی و در ناحیه جوش صفحه فولادی به بولت عرشه اتفاق افتاد. این موضوع بیانگر آن است که ضعف جزئیات اجرایی در محل جوشکاری، عملکرد لرزه‌ای اتصال PEST را محدود ساخته است. به طور کلی،

محقق می‌شود. همچنین، کنترل کیفی دقیق و استفاده از روش‌های غیرمخرب در ارزیابی جوشکاری باید به‌طور جدی مدنظر قرار گیرد. برای پروژه‌های آتی، انجام مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی جزئیات اتصال، تحلیل سناریوهای مختلف ایجاد مفصل پلاستیک و بررسی رفتار تحت بارهای متناوب و شرایط بحرانی می‌تواند راهگشا باشد. در نهایت، یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنای طراحی لرزه‌ای بهینه و ارتقای دوام و ایمنی اسکله‌های شمع‌محور کشور قرار گیرد.

تفاوت رفتار دو نمونه را می‌توان ناشی از اختلاف در نوع ساختار اتصال، کیفیت و جزئیات جوشکاری، و نحوه انتقال نیروها دانست؛ به‌ویژه آنکه در نمونه PEST، کم بودن طول مؤثر ناحیه جوش، عامل تمرکز تنش و شکست زود هنگام بوده است. بر اساس این یافته‌ها، توصیه می‌شود در طراحی اتصالات شمع به عرشه، محل تمرکز تغییر شکل پلاستیک و آسیب کنترل‌شده به صورت هدفمند در پای شمع پیش‌بینی شود تا از انتقال آسیب به عرشه جلوگیری گردد. این هدف با اصلاح جزئیات مهار آرماتورها، افزایش ظرفیت خمشی و مهار عرضی عرشه، و بهبود کیفیت جوشکاری

References

- [1] Li C, Wang Q, Zhu R, Zhu Y, Hu Y. Damage identification for pile foundation in high-piled wharf using composite energy factors driven by dynamic response under wave impact excitation. *Ocean Engineering*. 2024. doi:10.1016/j.oceaneng.2023.116286
- [2] Zhu RH, Wang QM, Zheng JH, Zeng HK, Zhang JB, Hu Y, et al. Damage detection of foundation pile in high-pile wharf based on statistical high-order moment of dynamic response under regular wave excitation. *Ocean Engineering*. 2023. doi:10.1016/j.oceaneng.2023.115180
- [3] Huang D, Wang S, Liu Z. A systematic review of prediction methods for emergency management. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2021. doi: 10.1016/j.ijdrr.2021.102412
- [4] Babaei S, Amirabadi R. Assessing seismic response equivalency for fixed pile-founded offshore platforms utilizing PSDA and IDA. *Structures*. 2022. doi: 10.1016/j.istruc.2022.09.053
- [5] Shokrzadeh MR, Nateghi-Alahi F. Evaluation of hybrid NSM-CFRP technical bars and FRP sheets for seismic rehabilitation of a concrete bridge pier. *Bridge Structures*. 2022;18:75–88. doi: 10.3233/BRS-290180
- [6] Shokrzadeh MR, Sharifi M, Nateghi Alahe F. Seismic retrofitting of concrete beam-column connections: Numerical study FRP strip and NSM technique. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*. 2024. doi: 10.48303/JSEE.2024.2031006.1099
- [7] Babaei S, Amirabadi R, Taghikhany T, Sharifi M. Optimal ground motion intensity measure selection for probabilistic seismic demand modeling of fixed pile-founded offshore platforms. *Ocean Engineering*. 2021. doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.110116
- [8] Omrani Z, Amirabadi R, Sharifi M. Effect of uncertainty on the seismic behaviour of fixed pile-founded offshore platforms. *Ships and Offshore Structures*. 2023. doi: 10.1080/17445302.2022.2109353
- [9] Lin L, Wang FC. Analytical behavior of concrete-filled steel tubular pile used in coastal wharf structure subjected to combined loads. *Ocean Engineering*. 2024; 308: 118388. doi: 10.1016/J.OCEANENG.2024.118388
- [10] Dehghani A, Aslani F. A review on defects in steel offshore structures and developed strengthening techniques. *Structures*. 2019; 20: 635–57. doi: 10.1016/J.ISTRUC.2019.06.002
- [11] Roeder CW, Graff R, Soderstrom J, Yoo JH. Seismic performance of pile-wharf connections. *Journal of Structural Engineering*. 2005. doi: 10.1061/(asce)0733-9445(2005)131:3(428)
- [12] Restrepo JI, Yin P, Jaradat OA, Weismair M. Performance of new pile-deck connections under earthquakes. *Ports 2007: 30 Years of Sharing Ideas 1977-2007; Proceedings of the Eleventh Triennial International Conference*. 2007. doi: 10.1061/40834(238)104
- [13] Lehman D, Roeder C. A new pile-deck connection for seismic performance enhancement of marginal wharves. *American Concrete Institute, ACI Special Publication*. 2012. doi: 10.14359/51686347
- [14] Lehman DE, Roeder C, Stringer SJ, Jellin A. Seismic performance of improved pile-to-wharf deck connections. *PCI Journal*. 2013. doi: 10.15554/pci.06012013.62.80
- [15] Foltz RR, LaFave JM, Lee D. Seismic performance of a structural concrete pile-wharf connection before and after retrofit. *Structures*. 2022. doi: 10.1016/j.istruc.2022.02.042
- [16] Soltani M, Amirabadi R. Seismic vulnerability assessment of pile-supported wharves using fragility surfaces. *Journal of Earthquake Engineering*. 2022. doi: 10.1080/13632469.2021.1961926

- [17] Takahashi A, Takemura J. Liquefaction-induced large displacement of pile-supported wharf. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2005. **doi: 10.1016/j.soildyn.2005.04.010**
- [18] Khosravifar A, Elgamal A, Lu J, Li J. A 3D model for earthquake-induced liquefaction triggering and post-liquefaction response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2018; 110: 43–52. **doi: 10.1016/J.SOILDYN.2018.04.008**
- [19] Heidary-Torkamani H, Bargi K, Amirabadi R, McClough NJ. Fragility estimation and sensitivity analysis of an idealized pile-supported wharf with batter piles. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2014; 61–62: 92–106. **doi: 10.1016/J.SOILDYN.2014.01.024**
- [20] Yang CSW, DesRoches R, Rix GJ. Numerical fragility analysis of vertical-pile-supported wharves in the Western United States. *Journal of Earthquake Engineering*. 2012; 16: 579–94. **doi: 10.1080/13632469.2011.641063**
- [21] Su L, Wan HP, Dong Y, Frangopol DM, Ling XZ. Seismic fragility assessment of large-scale pile-supported wharf structures considering soil-pile interaction. *Engineering Structures*. 2019; 186: 270–81. **doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.02.022**
- [22] Lobedan FR, LaBasco T, Ogunfunmi K. Wharf embankment and strengthening program at the Port of Oakland. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2002. **doi: 10.1016/S0267-7261(02)00138-0**
- [23] Banayan-Kermani A, Bargi K, Heidary-Torkamani H. Seismic performance assessment of pile-supported wharves retrofitted by carbon fibre-reinforced polymer composite considering ageing effect. 2016;19:581–98. **doi: 10.1177/1369433216630187**
- [24] Foltz RR, LaFave JM, Lee D. Seismic performance of a structural concrete pile-wharf connection before and after retrofit. *Structures*. 2022;38:874–94. **doi: 10.1016/j.istruc.2022.02.042**
- [25] Zheng Y, Zhang R. Experimental study on the damage characteristic and assessment of transverse bent frame of high-piled wharf under impact load. *Developments in the Built Environment*. 2023; 14: 100124. **doi: 10.1016/j.dibe.2023.100124**
- [26] Omrani Z, Amirabadi R, Sharifi M. Pile length optimization in fixed template offshore platform using risk reduction approach. *International Journal of Coastal, Offshore and Environmental Engineering*. 2021;6:33–43. **doi: 10.22034/IJCOE.2021.150789**
- [27] ASTM International. ASTM A370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. ASTM International. 2020.
- [28] BS 1881-121. Testing Concrete - Part 121: Method for determination of the compressive strength of concrete cores. 1983.
- [29] Industrial, Architecture Press of China B. GB/T 2419-2005, Test Method for Fluidity of Cement Mortar. 2005.
- [30] ACI Committee 374.1. Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary: an ACI Standard. 2005.
- [31] Al-Salloum YA, Almusallam TH, Alsayed SH, Siddiqui NA. Seismic behavior of as-built, ACI-complying, and CFRP-repaired exterior RC beam-column joints. *Journal of Composites for Construction*. 2011. **doi: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000186**
- [32] Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. 2017. **doi: 10.1061/9780784414859**
- [33] Arockiasamy M, Arvan PA. Behavior, performance, and evaluation of prestressed concrete/steel pipe/steel H-pile to pile cap connections. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2022. **doi: 10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000671**
- [34] Wang JT, Sun Q, Li YW, Liu XH. Hysteretic performance of circular high-strength concrete-filled double skin steel tubular columns: Experiment. *Marine Structures*. 2024. **doi: 10.1016/j.marstruc.2023.103519**