

Enhancing the Seismic Resilience of Aerial Substations: A Case Study of a Mid-Line Two-Pole 315 kVA Transformer

Hamid Toopchi-Nezhad * 

Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

ABSTRACT: Experience from past earthquakes has shown that transformers installed on aerial utility poles are among the most vulnerable components in power distribution networks. Significant vibrations and rotations of transformers during seismic events can damage transformer accessories such as bushings, and compromise the connections of their mounting platforms, potentially leading to sliding or overturning of the transformer. In most existing aerial substations in Iran, one or both ends of the transformer platform are connected to the reinforced concrete poles using friction-based joints instead of standard bolted connections. This paper investigates the underlying reasons for the widespread use of frictional connections in conventional pole-mounted substations and evaluates the seismic behavior of a 315 kVA two-pole transformer installation located at mid-span of a distribution line. The main contribution of this study lies in diagnosing prevalent technical flaws in standard aerial substation connections nationwide and introducing a novel seismic retrofit strategy. The proposed retrofit method is founded on two key principles: simplicity and technical refinement. Simplicity ensures the solution avoids execution complexity and costly equipment, while technical refinement guarantees a coherent, well-balanced design with no mismatches or inconsistencies. Nonlinear time history analyses reveal that the seismic performance of the frictional platform-to-pole connections is inadequate, rendering the substation vulnerable under design-level earthquake scenarios. Subsequently, retrofit solutions are proposed to improve the resilience of the transformer platform connections. The seismic response of the retrofitted substation is then compared to its original, unstrengthened state. The proposed retrofit measures significantly enhance the performance level of the aerial substation by limiting transformer rotation to below 0.015 radians, thereby improving transformer stability under design-level seismic events.

Review History:

Received: Jul. 24, 2024

Revised: Dec. 27, 2024

Accepted: Apr. 19, 2025

Available Online: Jun. 09, 2025

Keywords:

Overhead Utility Substation

Distribution Transformer Platform

Resilience

Concrete Pole

Seismic Retrofitting

1- Introduction

Significant transformer rotation in overhead distribution substations is a common seismic failure mode, often causing damage to attachments or transformer collapse. Research on typical aerial substations in Iran is limited. Jafari et al. [1], through dynamic analysis of a two-pole aerial substation, identified the weak torsional resistance of the platform-to-transformer connection as the main vulnerability and proposed retrofitting details. Zekavati et al. [2], in assessing damage to distribution networks following the 2013 Bushehr earthquake, attributed most failures to excessive transformer rotation and confirmed the effectiveness of standard bolted connections with bracing through finite element analysis. Similarly, Motaei and Akashe [3] identified failure or loosening of platform connections during seismic excitation as the dominant failure mode in Tehran's aerial substations.

This study investigates the seismic behavior of a mid-line two-pole aerial substation through a case study. The transformer platform-to-concrete pole connection reflects commonly used construction practices observed across many

regions of the country. The research assesses the seismic performance of this connection, identifies its technical deficiencies, and proposes an innovative retrofitting detail. Finally, the performance of the retrofitted substation is evaluated through time-history analyses.

2- Problem Statement and Contributing Factors

According to National Guideline No. 375 [4] and the Tavanir Aerial Distribution Line Standard [5], the metal platform supporting pole-mounted transformers must be bolted to each concrete pole. The platform consists of two main longitudinal C sections; each anchored to the pole via a pair of transverse brackets. Lateral and out-of-plane stability of the platform-transformer assembly under lateral loads or eccentric gravity loads is provided by diagonal straps, bolted at one end to the pole and at the other to the transverse brackets.

The transformer platform must be installed 485 cm from the top of the taller pole [4]. However, in practice, implementing the bolted connections as detailed in Ref. [4]

*Corresponding author's email: h.toopchinezhad@razi.ac.ir

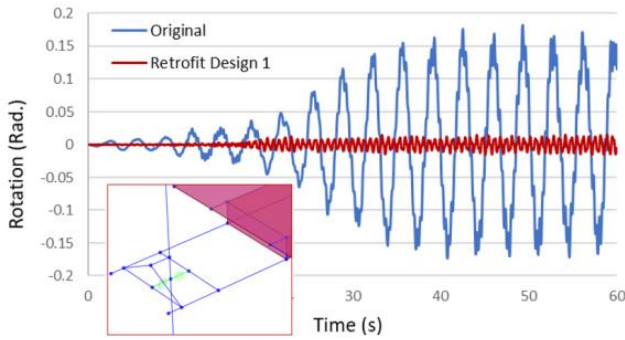


Fig. 1. Time history of aerial transformer rotations during the 1990 Manjil Earthquake

is not feasible. This is because, at the required installation height, the standard 12 m poles (constructed per [6]) lack predrilled holes needed to fasten the transverse brackets and diagonal braces to the poles. As a result, various nonstandard connection details are used in practice. A common feature among them is the reliance on uncontrolled and unreliable frictional resistance between the transverse brackets and the concrete poles to transfer gravity loads and overturning moments from the transformer to the structure.

3- Modeling

The substation includes a 315 kVA transformer with a 970×1560 mm footprint and 1543 mm total height. As this study focuses on the structural behavior of the poles and transformer platform; internal modeling of the transformer components is excluded. Per International Electrotechnical Commission, IEC 60076, transformers must withstand up to 0.3 g without damage. Assuming standard-compliant units, only the transformer's dimensions, mass (1355 kgf), and center of gravity are modeled in SAP2000 [7]. The transformer is represented as a cuboid in the model, with thick steel shell elements (18.23 mm) used to simulate its mass distribution and center of gravity accurately.

The transformer platform consists of two continuous longitudinal C14 resting on and bolted to transverse brackets (C12 sections). Since the concrete poles are modeled as dimensionless line elements, the transverse brackets are placed at a distance equal to the pole cross-section width at the platform level.

The bearing connection between the brackets C12 and concrete poles is modeled using a nonlinear link with a multi-linear isotropic hysteretic model. Estimating the torsional resistance of the frictional platform-to-transformer connection is challenging due to variations in execution, inconsistent manual bolt tightening, and the absence of calibrated tools like torque wrenches. Nevertheless, in this study, the sliding and torsional resistance of the frictional connections is conservatively estimated to be 20 kN and 3 kN.m, respectively.

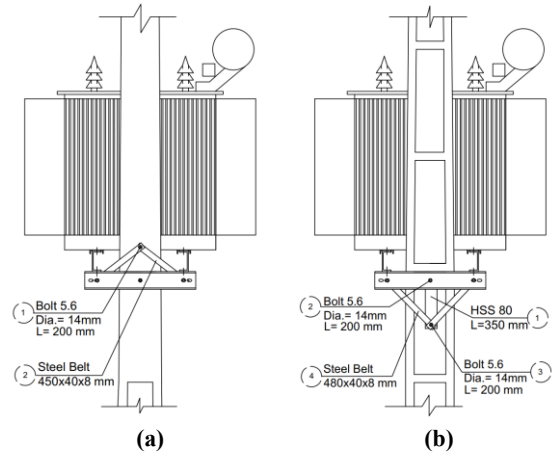


Fig. 2. Retrofit details for the platform-to-concrete-pole connection of the aerial substation: a) connection to the 9 m pole, and b) connection to the 12 m pole

The platform-to-pole connection is modeled using two nonlinear links, attached to the midpoints of the transverse brackets bearing on either side of the pole cross-section. These links are restrained against translational motion in the x and y directions and rotation about the z -axis. Their yield capacities are defined as 10 kN in the z -direction (sliding force) and 1.5 kN·m for rotation about the x and y axes.

4- Performance Evaluation

Time-history analyses used accelerograms from four major Iranian earthquakes: Tabas (1978), Manjil (1990), Bam (2003), and Serpol-e Zahab (2017). Each three-component record was scaled to the design spectrum per Iran Standard 2800 [8], considering hazard level and the substation's 0.92 s fundamental period. Stations on Type III soil matched the site conditions. The 1990 Manjil earthquake caused the strongest response, so its results are presented.

Original Platform: Figure 1 (blue) presents the transformer platform rotation time-history during the 1990 Manjil earthquake, showing significant amplitudes that risk serious damage to sensitive components. These rotations assume constant frictional resistance; however, seismic slip can reduce normal pressure on sliding surfaces, lowering friction, destabilizing the connection, and increasing overturning risk.

Retrofit Design 1: The platform's transverse brackets are braced to the concrete poles with two diagonal straps on each side, while the frictional connections remain unchanged. The braces are made from 8×40 mm steel straps. A rigid horizontal element, representing the distance between the pole's centerline and the outer edge where braces attach, models the brace-to-pole connection (Figure 1). As seen in Figure 1 (red) a significant reduction is achieved in transformer rotations after installing the diagonal braces.

Retrofit Design 2: In Retrofit Design 1, friction connections carry loads, so weakness risks failure. Retrofit Design 2 replaces friction with bolted transverse channels

to the concrete pole, matching standard details [4] and ensuring static stability. This reduces transformer rotations significantly.

Retrofit details for the platform connections are shown in Figure 2. Two 16 mm holes, spaced about 30 cm apart along the 12 m pole's web at the platform level, enable bolting the transverse channels. Low-density shear reinforcement allows drilling without obstruction. The web thickness (7–8 cm) permits easy drilling with specialized tools.

5- Conclusions

A simple yet professional retrofit detail for strengthening frictional platform-to-concrete pole connections was proposed and validated through computer modeling. This detail is applicable for upgrading many existing aerial substations.

6- Acknowledgements

Financial support for this research is gratefully acknowledged from the Kermanshah Regional Electricity Distribution Company under Research Contract No. 765/D/98.

References

- [1] M.A. Jafari, Rahnavard, A., Zekavati, A.A., Vulnerability of Aerial Transformers in Earthquakes and Their Retrofit Solutions in: 26th International Power System Conference, Tehran, Iran, 2011.
- [2] A. Zekavati, Jafari, M.A., and Rahnavard, A. , Performance assessment of power distribution network in 2013 Bushehr, Iran, Earthquake, in: 7th International Conference on Seismology & Earthquake Engineering (IISES), Tehran, Iran, 2015.
- [3] Y. Motaei, Akashe, B., Earthquake hazard in Tehran and the study of failure moods of power distribution equipment during earthquake, Journal of New Research in Seismology, JNRS, 10(35) (2015) 5-8.
- [4] General and Technical Specifications and Execution Procedures for 20 and 33 kV Aerial and Ground Distribution Substations., in: Publication 375, Management and Planning Organization of Iran, Tehran, Iran, 2007.
- [5] Standard for Aerial Distribution Lines - Cross Arms and Pole Arrangements Used in the Distribution Network, in, Ministry of Energy - Tavanir Company - Research and Technology Deputy - Standards Office - Volume 6, Tehran, Iran, 1998.
- [6] Guidelines for Determining Requirements, Technical Evaluation Criteria, and Tests for Reinforced Concrete Square Poles., in, Tavanir Company, Distribution Coordination Deputy, Technical and Engineering Distribution Office, Concrete Poles Specialized Committee, 3rd Edition Tehran, Iran, 2017.
- [7] CSI, SAP2000 Integrated Software for Structural Analysis and Design, Version 20, Computers and Structures Inc., Berkeley, CA, 2017.
- [8] Building Design Code for Earthquake Resistance (Standard 2800) - 4th Edition, in, Road, Housing, and Urban Development Research Center Tehran, Iran, 2014.



بهبود تاب آوری پست های هوایی در برابر زلزله: مطالعه موردی (ترانسفورماتور ۳۱۵kVA مستقر بر دو پایه بتنی واقع در میانه خط)

حمید توپچی نژاد*^{1b}

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۰۷

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۳۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹

کلمات کلیدی:

پست های هوایی

سکوی ترانسفورماتور توزیع

تاب آوری

پایه بتنی

مقاوم سازی لرزه ای

خلاصه: تجربه زلزله های گذشته نشان داده که ترانسفورماتورهای موجود در پست های هوایی از جمله تجهیزات آسیب پذیر در خطوط توزیع نیرو می باشند. ارتعاشات و دوران های قابل توجه ترانسفورماتور در هنگام زلزله منجر به آسیب دیدن ملحقات آن (همانند پوشینگ ها)، اتصالات سکوی نشیمن، و نهایتاً لغزش یا واژگونی ترانسفورماتور می گردد. در غالب پست های هوایی موجود یک و یا هر دو انتهای سکوی ترانسفورماتور توسط اتصالات اصطکاکی - بجای اتصالات استاندارد پیچ و مهره ای - به پایه های بتن آرمه پست متصل شده اند. در مقاله حاضر ضمن ریشه یابی دلایل کاربرد وسیع اتصالات اصطکاکی در پست های متعارف، رفتار لرزه ای یک پست دوپایه ۳۱۵ kVA واقع در میانه خط توزیع مطالعه شده است. براساس تحلیل های تاریخیچه زمانی غیرخطی انجام شده در این مقاله عملکرد لرزه ای اتصالات اصطکاکی سکوی ترانسفورماتور به پایه ها نامناسب بوده و بنابراین پست هوایی مورد بررسی فاقد تاب آوری لازم در قبال زلزله مبنای طرح خواهد بود. در ادامه با ارائه راهکارهای بهسازی لازم، اتصالات سکوی ترانسفورماتور مورد نظر مقاوم سازی شده و پاسخ لرزه ای پست مقاوم سازی شده با رفتار لرزه ای قبل از مقاوم سازی آن مقایسه شده است. جزئیات مقاوم سازی ارائه شده در این پژوهش با محدود کردن دوران های ترانسفورماتور به کمتر از ۰/۰۱۵ رادیان به طور قابل توجهی موجب ارتقای سطح عملکرد پست هوایی و افزایش پایداری ترانسفورماتور آن در برابر زلزله های نظیر سطح مبنای طراحی خواهد شد.

۱- مقدمه

یکی از متداول ترین مدهای خرابی مشاهده شده در زلزله های گذشته دوران های قابل توجه ترانسفورماتورها در پست های هوایی توزیع نیرو است که منجر به آسیب دیدگی و یا شکست اجزای الحاقی ترانسفورماتور و یا سقوط آن می گردد [۱]. این مود شکست در قدیمی ترین زلزله ها، همانند زلزله Kern County (۱۹۵۲) که در طی آن بیش از ۸۰۰ ترانس هوایی تکیه گاه خود را از دست داده و سقوط کردند، نیز مشاهده شده است [۲]. حتی در زلزله های متوسط نیز - همانند زلزله شهر دشتی استان بوشهر (۱۳۹۲/۰۱/۲۰) با بزرگای ۶/۲ - واژگونی ترانسفورماتورها گزارش شده است [۳]. در زلزله های شدید و تاریخی سه دهه اخیر کشور همانند زلزله های منجیل و رودبار (۱۳۶۹، بزرگای ۷/۴)، بیرجند (۱۳۷۶، بزرگای ۷/۳)، بم (۱۳۸۲، بزرگای ۶/۵)، و ازگله و سرپل ذهاب (۱۳۹۶، بزرگای ۷/۳) واژگونی و فروافتادن ترانس های هوایی بخش لاینفک خسارات وارده بر شبکه توزیع

فشار ضعیف بوده است [۴، ۵]. تنها در شهر بم ۳۱۸ ترانس هوایی دچار آسیب شدند که در میان آنها ۵۰ ترانس از نشیمن گاه خود سقوط کرده بودند [۱]. در زلزله سال ۱۳۹۶ سرپل ذهاب، پست های هوایی دچار آسیب های جدی شدند که شناخته شده ترین مورد آن مربوط به پست هوایی مجتمع مسکن مهر در محله فولادی این شهر بود.

مطالعات متعددی در ادبیات تحقیق پیرامون ارزیابی عملکرد لرزه ای سامانه های توزیع نیرو موجود است. این مطالعات طیف گسترده ای از موضوعات را پوشش می دهند، از جمله ارتقای تاب آوری لرزه ای سامانه های توزیع برق [۶]، بررسی مکانیزم های خرابی و تحلیل شکنندگی لرزه ای خطوط انتقال هوایی با لحاظ تعامل شمع-خاک-سازه [۷]، ارزیابی رفتار لرزه ای ترانسفورماتورهای زمینی [۸] و بررسی تاب آوری لرزه ای و تدوین استراتژی مقاوم سازی سیستم پست برق [۹].

در مقابل، در زمینه پست های هوایی رایج در کشور، تحقیقات علمی محدودی انجام شده است. به عنوان نمونه، در مرجع [۱۰]، رفتار سازه ای

* نویسنده عهده دار مکاتبات: h.toopchinezhad@razi.ac.ir





شکل ۲. پست هوایی ۳۱۵ kVA مورد مطالعه؛ الف) نمای کلی؛ ب) جزئیات اتصال به پایه ۹ m؛ پ) جزئیات اتصال به پایه ۱۲ m

Fig. 2. Case study of a 315 kVA air post: a) Overall view, b) Details of the connection to the 9 m pole, c) Details of the connection to the 12 m pole

و فقط مولفه های قائم کشش سیم به پایه وارد می‌شوند. پست هوایی در شهر کرمانشاه با خطر نسبی زیاد زلزله و در زمین نوع III براساس طبقه بندی استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۱۰] واقع شده است. ترانسفورماتور مورد مطالعه به ترتیب در فواصل ۵۲۵ cm و ۲۳۱ cm از انتهای پایه های بلندتر و کوتاه تر طرفین خود قرار گرفته که بسیار پایین تر از تراز استاندارد استقرار در پایه های بتنی است (شکل ۲-الف).

شکل ۲-ب نمای نزدیک اتصال نشیمن ترانسفورماتور به پایه کوتاه تر آن را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد ناودانی های کوتاه تر عمود بر نشیمن که به عنوان زیرسری ناودانی های بلند عمل می نمایند- توسط پیچ و مهره به پایه بتنی متصل شده اند. پیچ مذکور در تحمل نیروهای ثقلی ناشی از وزن ترانسفورماتور به پایه دارای عملکرد مناسبی خواهد بود. با این حال لازم است در هنگام زلزله لنگرهای محرک ناشی از نیروی اینرسی ترانسفورماتور به نحو مناسبی توسط تکیه گاه مهار شوند تا پایداری ترانسفورماتور تامین گردد. لنگرهای مذکور بصورت کوپل کشش و فشار در محل اتصال ناودانی های بلند به ناودانی های زیرسری وارد می‌گردند. به عنوان یک نقیصه جدی، دستک های مورب (تسمه های به عرض ۵۰ mm و ضخامت ۵ mm [۷]) در اتصال نشان داده شده در شکل ۲-ب حذف شده اند و بجای آن ها ناودانی های مهاري نشان داده شده در شکل

طبق استاندارد، تراز نصب سکوی نشیمن ترانسفورماتور باید در فاصله ۴۸۵ cm از انتهای پایه بلندتر باشد [۱۲]. در عمل اجرای اتصالات پیچ و مهره طبق جزئیات استاندارد شکل ۱ امکان پذیر نیست، زیرا در تراز نصب سکوی ترانس سوراخ های لازم در پایه های ۱۲ m موجود (که طبق جزئیات مرجع [۱۴] ساخته می‌شوند) پیش بینی نشده است تا امکان پیچ کردن ناودانی های زیرسری و تسمه های مهاري آنها به پایه میسر باشد. به همین جهت در عمل جزئیات متنوعی از اتصالات دیده می‌شود که وجه مشترک تمامی آنها انتقال بارهای ثقلی و لنگرهای واژگونی ترانسفورماتور به پایه ها با اتکا بر مقاومت اصطکاکی کنترل نشده و غیر قابل اتکا بین ناودانی های زیرسری و پایه بتنی است.

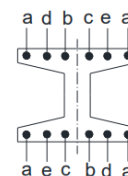
۳- پست هوایی مورد مطالعه

شکل ۲ نمای کلی پست هوایی مورد مطالعه را نشان می‌دهد که در آن ترانسفورماتور ۳۱۵ kVA بر روی دو پایه ۹/۶۰۰ و ۱۲/۴۰۰ مستقر شده است. این پست هوایی در ضلع جنوب-غربی تقاطع بلوار آل آقا و بلوار ۳۰ متری دوم در منطقه ۲۲ بهمن شهر کرمانشاه واقع شده است. پایه ۱۲ m پست در میانه خط توزیع نیرو قرار داشته و از نوع پایه مماسی [۱۵] است. بنابراین، مولفه های افقی کشش سیم در طرفین پایه با یکدیگر متعادل بوده

جدول ۱. مشخصات هندسی و تسلیح پایه های بتن آرمه پست [۸]

Table 1. Geometric and reinforcement specifications of reinforced concrete poles [8]

Pole	Lower-base cross section (mm)	Upper-end cross section (mm)	Web thickness at H-Section (mm)	Reinforcement details along length L (mm) from the base of the pole
9/600	475×325	250×190	70	a (φ16, L900) b (φ14, L700) c (φ14, L600) d (φ14, L500) e (φ14, L300)
12/400	460×310	220×190	60	a (φ16, L1200) b (φ14, L900) c (φ14, L750) d (φ14, L600) e (φ14, L450)



هندسی در طول پایه می باشند. مقطع عرضی پایه از ته آن تا فاصله ۳ متری از راس انتهایی بصورت H شکل بوده و در ۳ متر انتهایی مستطیل شکل می باشد. در ناحیه ۳ متر انتهایی شبکه ای از سوراخ ها به قطر ۲۰ mm جهت اتصال ادوات و تجهیزات مختلف در پایه ها پیش بینی شده است. مشخصات ابعاد هندسی و تسلیح آرماتور پایه های بتنی در جدول ۱ ارائه شده است.

در این پژوهش از المان های غیرمنشوری در تعریف پایه های بتنی استفاده بعمل آمده است. در این مدل سازی مقاطع عرضی پایه در ابتدا و انتهای فاصله ای که تعداد آرماتورهای طولی مقطع یکسان می باشد در محیط «طراحی مقطع»^۱ نرم افزار تعریف شده و نهایتاً مقطع عرضی غیرمنشوری پایه با تشکیل جدولی که توالی مقاطع عرضی تعریف شده در محیط مذکور در آن مشخص شده است تعریف می گردد. در بخش طراحی، از نرم افزار خواسته می شود تا صرفاً به کنترل کفایت مقطع تحت اثر ترکیب بارهای مختلف بپردازد.

طبق استاندارد (مرجع [۱۴])، مقاومت مشخصه نهایی بتن مصرفی ۳۰ MPa (نمونه استوانه ای) می باشد که بدلیل تولید پایه ها در کارگاه های تولیدی تحت نظارت فنی، معمولاً این مقاومت محقق می شود. به همین سبب در این پژوهش نیز همین عدد مبنای کار قرار داده شده است.

۴-۲- ضریب رفتار، R، پایه ها

در این بخش با تحلیل استاتیکی خطی پایه بتنی ۱۲/۴۰۰ و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی مذکور در مرجع [۱۰] و با توجه به ماهیت غیرخطی نتایج آزمایشگاهی، ضریب رفتار R پایه بتنی تخمین زده می شود. روش استاندارد انجام آزمایش بدین صورت است که پایه بر روی زمین خوابانده

تعبیه شده اند. بنابراین، کوپل کشش و فشار وارده بر ناودانی های زیرسری می باید توسط ناودانی های مهاري زیرین از طریق اصطکاک به پایه بتنی منتقل گردد. با توجه به پیچ نشدن ناودانی های زیرسری به ناودانی های مهاري امکان انتقال کوپل کششی بین آن دو غیر ممکن است. علاوه بر آن، هیچ آیین نامه ای انتقال نیروهای زلزله از طریق اصطکاک را ایمن و مجاز نمی شمارد. بنابراین، جزییات اتصال سکوی نشیمن به پایه کوتاه تر پست ایمن ارزیابی نمی شود.

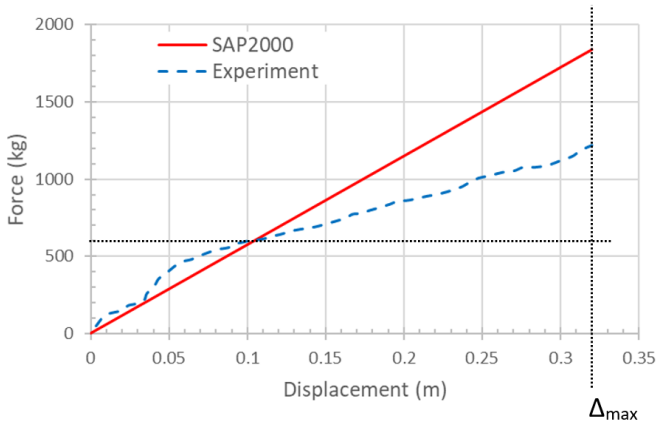
شکل ۲-پ نمای نزدیک اتصال نشیمن ترانسفورماتور به پایه بلندتر آن را نشان می دهد. در این اتصال مسیر انتقال نیروهای ثقلی ناشی از وزن ترانسفورماتور و نیز کوپل کشش و فشار ناشی از لنگر های وارده در هنگام زلزله تنها از طریق اصطکاک بین ناودانی های زیرسری و ناودانی های مهاري تامین شده است. مهره ها معمولاً بصورت دستی توسط کارگر سفت می شوند و اصولاً میزان کشش حاصل در پیچ ها و در نتیجه فشار عمودی موثر بر سطح تماس ناودانی و پایه مقادیر کنترل شده ای ندارد. بنابراین، این نوع اتصال ماهیتاً غیرایمن ارزیابی می گردد. اتصال ناودانی های زیرسری به پایه ها بدون کاربرد پیچ و مهره و نیز عدم اجرای دستک های مهاري استاندارد در مهار لنگر های وارده بر اتصال از جمله نواقص اصلی این اتصال محسوب می شوند. قرار گرفتن سکوی ترانسفورماتور در تراز نامناسب یکی از اصلی ترین دلایل بروز نواقص مذکور و ندانم کاری در جزییات اجرایی اتصال شده است.

۴-۴ مدل سازی پست هوایی

۴-۱ مدل سازی پایه های بتن آرمه

پایه های بتن آرمه دارای مقاطع عرضی غیرمنشوری با تغییرات خطی ابعاد

1. section designer



شکل ۴. مقایسه نتایج تحلیل خطی (مدل SAP۲۰۰۰) و رفتار غیرخطی (نتایج آزمایشگاهی [۱۰]) پایه ۱۲/۴۰۰

Fig. 4. Comparison of linear analysis results (SAP2000 model) and nonlinear behavior (laboratory test results [10]) for pole 400/12.

در تحقیق حاضر فرآیند آزمایش توسط مدل خطی پایه که در نرم افزار SAP2000 تعریف شده شبیه سازی شده است (شکل ۳ ب). شکل ۴ منحنی نیرو-تغییر مکان جانبی راس پایه ۱۲/۴۰۰ بدست آمده از آزمایش [۱۰] و نیز نتایج شبیه سازی فرآیند آزمایش توسط مدل خطی پایه (خروجی های تحلیل SAP2000) را نشان می دهد.

لازم به ذکر است به منظور در نظر گرفتن اثر ترک خوردگی بتن، ممان اینرسی های موثر پایه در هر دو امتداد اصلی آن (I_e) با توجه به شکل پذیری محدود پایه ها معادل ۷۰٪ ممان اینرسی کلی پایه (I_g) در نظر گرفته شده است. خط نقطه چین افقی، حد مقاومت ارتجاعی پایه، ۶۰۰ kgf بدست آمده از آزمایش را نشان می دهد. این حد را می توان مقاومت طراحی پایه، F_D ، در نظر گرفت. مقاومت نهایی پایه، F_u ، طبق آزمایش معادل ۱۲۰۰ kgf است. در این حد از نیرو، بر اساس نتایج آزمایش جابجایی بیشینه حاصل در راس پایه، Δ_{max} ، برابر ۰/۳۲ m اندازه گیری شده است [۱۰]. نیروی نظیر این جابجایی در مدل ارتجاعی پایه $F_e = ۱۸۳۷$ kgf می باشد. این نیرو حدود سه برابر نیروی حد ارتجاعی پایه (۶۰۰ kgf) است که با ضریب رفتار $R=3$ پایه که توسط استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۱۰] توصیه شده است سازگاری دارد. مقاومت نهایی پایه، F_u ، دو برابر نیروی حد ارتجاعی آن (۶۰۰ kgf) است که این نسبت با ضریب اضافه مقاومت $\Omega_0 = 2$ ارائه شده توسط مرجع [۱۰] متناسب می باشد. بنابراین، لحاظ کردن ۷۰٪ ممان اینرسی پایه در تحلیل های ارتجاعی خطی منطقی است.

(ب)

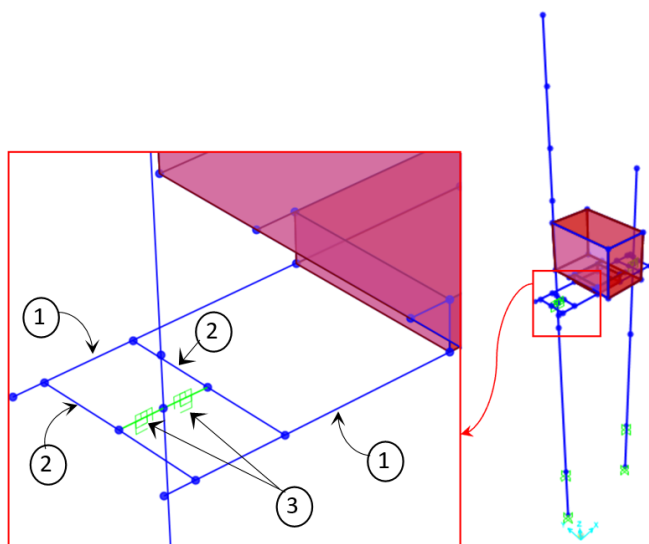
(الف)

شکل ۳. الف) آزمایش پایه ۱۲/۴۰۰ [۱۰]، ب) شبیه سازی آزمایش در نرم افزار SAP۲۰۰۰

Fig. 3.a) Test of Pole 12/400, b) Simulation of the test in SAP2000 Software

شده و انتهای آن به میزان ۰/۱۴ طول پایه (۱/۶۸ متر) داخل دیواره یک سکوی بتنی قرار می گیرد (شکل ۳ الف). نیروی متمرکز در امتداد عمود بر محور طولی پایه در فاصله یک متری از راس آن به پایه وارد شده و در هر مرحله به اندازه ۲۵ درصد مقاومت اسمی پایه بر مقدار آن اضافه می گردد. در هر نوبت افزایش نیرو، تغییر مکان راس تیر و همچنین تعداد و محل ترک ها یادداشت می گردند. بارگذاری و قرائت تغییر شکل های راس پایه و رصد ترک های حاصل در آن تا حد گسیختگی پایه ادامه می یابند.

پایه در امتداد عمود بر محور قوی تر مقطع عرضی خود در سه سطح مقاومت نرمال، مقاومت مرحله ارتجاعی و مقاومت نهایی بارگذاری می گردد. عملکرد مورد انتظار از پایه در سطح مقاومت نرمال (۴۰۰ kgf) آن است که هیچگونه ترکی در آن مشاهده نشده، تغییر مکان راس متناسب و یکنواخت بوده و پس از حذف نیرو راس پایه تقریباً به حالت اولیه بازگشته و بجز ترک های مویی هیچ گونه ترکی مشاهده نگردد. عملکرد پایه در سطح مقاومت مرحله ارتجاعی (۶۰۰ kgf) هنگامی قابل قبول است که در صورت ایجاد ترک در مقابل ازدیاد نیرو، این ترک ها در موقع بازگشت نیرو تا حد مقاومت نرمال کاملاً بسته شوند. ضمناً تغییر مکان راس پایه در مراحل فوق می باید متناسب با نیروی وارده باشد. پایه بتنی در صورتی آزمایش را در سطح نهایی با موفقیت به پایان رسانده که مقاومت نهایی آن بیش از سه برابر ظرفیت اسمی آن باشد. به عبارتی برای پایه ۱۲-۴۰۰، پایه تا ۱۲۰۰ kgf به حد گسیختگی نرسد.



شکل ۵. مدل‌سازی پست هوایی و اتصالات اصطکاکی سکوی ترانسفورماتور به پایه‌ها توسط المانهای لینک غیرخطی

Fig. 5. Modeling of the aerial post and the friction connection between the platform and the concrete poles using nonlinear link elements

۴-۳- مدل سازی ترانسفورماتور

هدف این پژوهش ارزیابی رفتار سازه‌ای پایه‌ها و سکوی نشیمن ترانسفورماتور می‌باشد. بنابراین، مدل سازی جزئیات سازه‌ای بدنه، هسته و سیم پیچ ترانسفورماتور هدف این تحقیق نیست. ترانسفورماتور و کلیه ملحقات آن طبق استاندارد IEC 60076^۱ باید طوری طراحی شده باشد که شتاب‌های وارده تا $0.3g$ را بدون هرگونه صدمه‌ای تحمل نماید [۱۲]. بنابراین، با فرض استفاده از ترانسفورماتورهای استاندارد در پست‌های هوایی، تنها ابعاد فیزیکی، وزن کل، و مختصات مرکز جرم ترانسفورماتور در مدل کامپیوتری پست هوایی با واقعیت منطبق است. پست هوایی مورد مطالعه دارای یک ترانسفورماتور ۳۱۵ kVA به وزن ۱۳۵۵ kgf و ابعاد پلان ۱۵۶۰×۹۷۰ mm و ارتفاع کل تا بالای مخزن ذخیره روغن ۱۵۴۳ mm است. در مدل کامپیوتری ترانسفورماتور به شکل حجم مکعبی متناسب با ابعاد فیزیکی آن تعریف شده است. جداره‌های حجم تعریف شده برای ترانسفورماتور توسط المانهای پوسته‌ای ضخیم^۲ از جنس فولاد با ضخامت ۱۸/۲۳ mm مدل شده‌اند تا با توجه به حجم تعریف شده برای ترانسفورماتور در مدل، جرم کل و موقعیت مرکز جرم آن را با دقت شبیه‌سازی نماید.

۴-۴- سکوی نشیمن و اتصال آن به پایه‌ها

شکل ۵ نمای سه بعدی پست هوایی مدل شده در نرم افزار SAP2000 و نمای نزدیک جزئیات مدل سازی اتصال سکوی ترانسفورماتور به پایه را نشان می‌دهد. نشیمن گاه ترانسفورماتور پست دارای دو ناودانی بلند نمره ۱۴ (آیتم ۱) است که بر روی ناودانی‌های زیرسری (آیتم ۲) قرار گرفته و پیچ می‌شوند. با توجه به آنکه پایه‌های بتنی پست توسط المان‌های خطی بدون بعد در نرم افزار تعریف شده‌اند، ناودانی‌های زیرسری با فاصله‌ای برابر با بعد مقطع عرضی پایه در تراز نشیمن‌گاه ترانسفورماتور تعریف شده‌اند. در مدل نرم افزار ناودانی‌های بلند (آیتم ۴) در تمام طول خود پیوسته بوده و ناودانی‌های زیرسری در دو انتهای خود به آن‌ها توسط اتصال مفصلی متصل شده‌اند.

اجزای سازه‌ای سکوی ترانس نیز توسط ناودانی‌های نمره ۱۴ (ناودانی‌های بلند) و ناودانی‌های کوتاه نمره ۱۲ (ناودانی‌های زیر سری) مدل شده‌اند. اتصال اتکایی ناودانی‌های کوتاه با پایه‌های بتنی توسط لینک غیرخطی با مدل چندخطی خمیری^۳ دارای حلقه‌های هیستریزس ایزوتروپیک مدل‌سازی شده است. تخمین مقاومت پیچشی اتصال اصطکاکی سکو به ترانس بدلیل تنوع نحوه اجرا، یکنواخت نبودن میزان سفت شدگی دستی پیچ‌ها در پست‌های مختلف، و عدم کاربرد تجهیزات کالیبره شده‌ای همانند

1. International Electrotechnical Commission
2. Thick Shell

3. Multilinear plastic

Z بوده و مقاومت تسلیم (نیروی لغزش) آنها در امتداد محور Z برابر ۱۰ kN و دوران حول محوره‌های X و Y برابر ۱/۵ kN.m در نظر گرفته شده است. با توجه به وجود دو لینک در هر تکیه گاه ترانسفورماتور، مقاومت هر تکیه گاه در برابر لغزش و دوران به ترتیب ۲۰ kN و ۳ kN.m محاسبه می‌شود.

۵- اثرات ساختگاهی و بارگذاری زلزله

در این پژوهش با توجه به مشارکت موده‌های بالاتر در پاسخ دینامیکی سیستم، محاسبات طراحی لرزه ای پست هوایی به روش های تحلیل طیفی و تاریخچه زمانی انجام شده است. در تحلیل های انجام شده اثرات p-delta، مولفه متعامد زلزله، و نیز مولفه قائم زلزله در نظر گرفته شده اند. با توجه به ضوابط مندرج در پیوست ششم مرجع [۱۸] در پست های هوایی، ترانسفورماتورهای قدرت و پایه ها در زمره سامانه های بحرانی دسته بندی می‌شوند. به همین جهت مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ ایران ضریب اهمیت $I=1/2$ در برآورد نیروهای زلزله در نظر گرفته شده است. همچنین، ضریب رفتار پایه های بتن آرمه نیز $R=3$ لحاظ شده است.

زمین منطقه براساس طبقه بندی استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۱۶] از نوع III طبقه بندی می‌شود. بنابراین، خاک منطقه نسبتاً نرم بوده و در چنین شرایطی احتمالاً در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک-سازه در محاسبات ضرورت خواهد یافت.

اثرات متقابل خاک-سازه می تواند بر موده‌های گسیختگی پایه ها و سکوی نشیمن ترانسفورماتور تاثیر گذار باشد. واژگونی و یا انحراف پایه ها از راستای قائم از موده‌های گسیختگی نامطلوبی است که بعضاً در زلزله های گذشته بدلیل شرایط نامناسب فونداسیون پایه مشاهده شده است. اصولاً در خاک هایی که مستعد چنین رفتاری هستند می باید با بکار بستن تمهیدات اجرایی لازم (همانند موارد پیشنهادی در مرجع [۱۹]) خطر واژگونی احتمالی پایه ها را با مهار مناسب آن ها در زمین مرتفع نمود. در تحقیق حاضر فرض می‌گردد که اصولاً پایه های مورد بررسی با خطر واژگونی و یا انحراف از راستای قائم که می تواند بر مود گسیختگی آنها و یا سکوی نشیمن تاثیرگذار باشد مواجه نمی باشند. بنابراین، پایه های بتنی پست با فرض تکیه گاه صلب (گیردار) مدل شده و اثرات ساختگاهی تنها در تاثیر نوع زمین در طیف پاسخ شتاب زلزله منظور شده است. در انتهای مدفون پایه و در محل قطع ارتباط آن با زمین تکیه گاه های گیردار تعریف شده اند تا طول مدفون ۱۷۵۰ mm پایه را تداعی نمایند (شکل ۵).

در تحلیل های طیفی از طیف طرح استاندارد آیین نامه ۲۸۰۰ ایران [۱۶]

ترکتر در سفت کردن پیچ ها بسیار مشکل است. با این حال، در پژوهش حاضر بر اساس فرضیات زیر، مقاومت لغزشی و پیچشی اتصالات اصطکاکی سکو به ترانس تخمین زده شده است.

با در نظر گرفتن وزن ۱۳۵۵ kgf ترانسفورماتور و نیز با توجه به وجود مجموعاً چهار سطح لغزش در سطح تماس تکیه گاه های سکوی ترانس با پایه های بتنی پست، برش اصطکاکی بسیج شده در هر سطح لغزش حدود ۳۳۹ kgf برآورد می‌گردد. با فرض ضریب اطمینان ۳ در برابر لغزش تحت بارهای ثقلی (وزن ترانس)، مقاومت اصطکاکی در هر سطح لغزش ۱۰۱۷ kgf تخمین زده می‌شود. ضریب اصطکاک استاتیکی بین فولاد و بتن، μ ، را می توان ۰.۵۷، در نظر گرفت [۱۷]. بنابراین، نیروی عمود بر سطح N که پس از سفت کردن پیچ های دو انتهای ناودانی های کوتاه تامین می‌شود برابر ۱۷۸۴ kgf محاسبه می‌گردد. برای تامین این نیرو در سطح تماس هر یک از پیچ های ۱۲ mm از نوع ۵/۶ با تنش تسلیم 3000 kgf/cm^2 در دوانتهای ناودانی کوتاه باید تحت تنش 1577 kgf/cm^2 قرار گیرند که حدود ۵۲٪ تنش تسلیم پیچ است. پس از سفت کردن اولیه پیچ ها (وضعیت snug-tight) این تنش با سه-چهارم دور سفت کردن مهره با روزه mm ۰/۲ در پیچی بطول ۱۰ cm تامین می‌گردد. با توجه به توان متوسط انسان امکان پیش تنیده کردن پیچ ها تا این حد، توسط یک آچار دستی ساده، به سختی امکان پذیر خواهد بود. بنابراین، کاربرد ضریب اطمینان ۳ در تخمین مقاومت اصطکاکی در سطح تماس ناودانی های کوتاه یک فرض محافظه کارانه است و در عمل ضریب اطمینان واقعی به مراتب کمتر خواهد بود.

مقاومت پیچشی اتصال، T، را می توان برحسب ضریب اصطکاک بین بتن و فولاد، μ ، نیروی عمود بر سطح، N، و عرض پایه در محل اتصال، b، از رابطه ساده شده (۱) محاسبه نمود [۱].

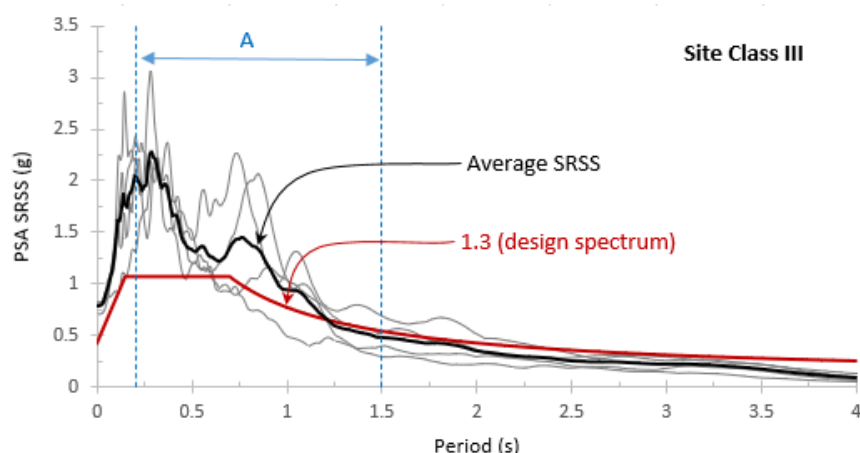
$$T = 0.5\mu Nb \quad (1)$$

با احتساب حدود ۳۰ cm عرض پایه در تراز نشیمن سکوی ترانس، مقاومت پیچشی اتصال ۱/۵ kN.m محاسبه میشود. جزئیات مدل سازی اتصالات اصطکاکی پست هوایی در شکل ۵ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود اتصال سکو به پایه توسط دو عدد لینک غیرخطی (آینم های ۳) تعریف شده است. لینک ها به نقطه میانی ناودانی های زیرسری که به طرفین مقطع پایه اتکا کرده اند، متصل شده اند. لینک های مذکور فاقد درجات آزادی انتقالی در امتدادهای X و Y و درجه آزادی دورانی حول محور

جدول ۲. مشخصات نگاشت های ثبت شده بر زمین نوع III زلزله های مورد استفاده در تحلیل های تاریخیچه زمانی

Table 2. Characteristics of the ground motions recorded on Site Class III and used in the time history analyses

Earthquake	M_w	Station	Epicentral Dist. (km)	PGA (cm/s ²)
Tabas (1978)	7.4	FDS-A	97	96
Manjil (1990)	7.7	LHJ-A	62	184
Bam (2003)	6.5	GBF1	111	30
Sarpol-e Zahab (2017)	7.3	RVN	70	120



شکل ۶. هم پایه نمودن زلزله ها با طیف پاسخ شتاب خطی زلزله مبنای طراحی (DBE) در زمین نوع III

Fig. 6. Scaling earthquakes with the Design Basis Earthquake (DBE) linear acceleration response spectrum for site class III

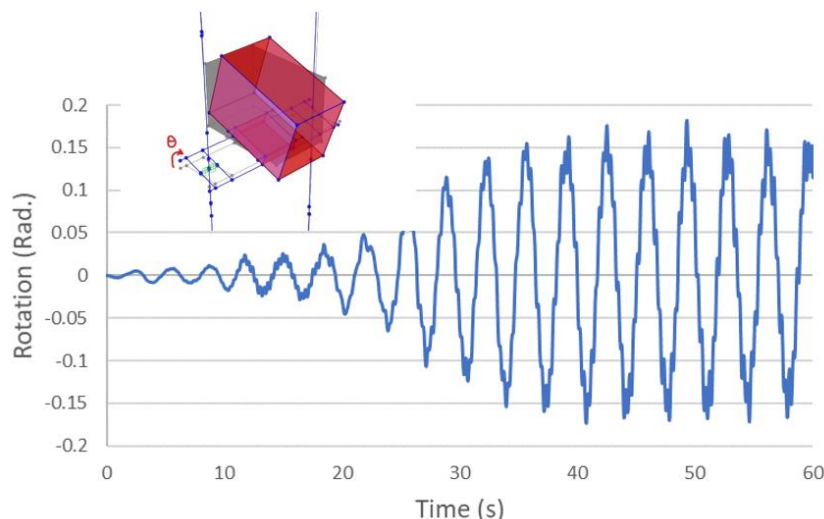
و قائم) بوده که با توجه به سطح خطر مورد نظر (زلزله مبنای طراحی مطابق تعریف استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۱۶]) و زمان تناوب اصلی پست هوایی مورد مطالعه ($0.92S$) نسبت به طیف مبنای طرح به روش مذکور در مرجع [۱۶] هم پایه شده اند. ضمناً ایستگاه های ثابت در زمین نوع III، سازگار با ساختگاه پست، قرار داشته اند.

برای همپایه کردن زلزله ها ابتدا نگاشت های مولفه های افقی هر زلزله با تقسیم بر بیشینه مطلق شتاب حرکت زمین در زلزله مذکور نرمالایز شده و سپس طیف جذر مجموع مربعات (SRSS) طیفهای دو مولفه افقی زلزله محاسبه شده است. در گام بعد میانگین طیف SRSS زلزله ها محاسبه و با $1/3$ برابر طیف زلزله طرح مقایسه شده است (شکل ۶). ضریب مقیاس قابل اعمال بر نگاشت های نرمالایز شده زلزله ها بگونه ای محاسبه شده تا طیف میانگین SRSS ها در محدوده A (0.2 تا $1/5$ برابر دوره تناوب اصلی سازه

استفاده شده است. ضمناً اثر مولفه قائم زلزله توسط طیف یکنواختی با مقدار شتاب طیفی $g_{AI} = 0.216$ در نظر گرفته شده که $A=0.3$ شتاب مبنای طرح در شهر کرمانشاه است. نکته دیگر آنکه جرم موثر سازه از تجمیع بارمرده بعلاوه 20% بار برف محاسبه شده است. دهانه کابل در طرفین پست 50 m فرض شده است.

همان گونه که در بخش ۱ مقاله ذکر شد، آسیب پذیری پست های هوایی در پی رخ داد زلزله های گذشته در کشور مشاهده شده است. بنابراین، در تحلیل های تاریخیچه زمانی از شتاب نگاشت های ثبت شده چهار زلزله تاریخی ایران که عبارتند از طیس (۱۹۷۸)، منجیل (۱۹۹۰)، بم (۲۰۰۳)، و ازگله-سرپل ذهاب (۲۰۱۷) استفاده شده است (جدول ۲). هر یک از زلزله های مذکور دارای سه شتاب نگاشت ثبت شده (مولفه های طولی، عرضی،

1. Span



شکل ۷. تاریخچه زمانی دوران های ترانسفورماتور پست هوایی تحت اثر زلزله منجیل (۱۹۹۰ میلادی)

Fig. 7. Time history of the air transformer rotations during the 1990 Manjil Earthquake

اصطکاکی اتصال در طول زلزله محاسبه شده اند. تجربه زلزله های گذشته مویید آن است که با لغزش اتصال، احتمال کاهش فشار قائم موثر در سطوح لغزش وجود داشته که این امر موجب افت مقاومت اصطکاکی و ناپایداری اتصال و واژگونی ترانسفورماتور می گردد.

۷- مقاوم سازی اتصالات سکوی ترانسفورماتور

۷-۱- طرح ایده

در طرح مقاوم سازی شماره ۱^۱ ناودانی های زیرسری سکو توسط دو دستک مورب در هر طرف ترانسفورماتور به پایه های بتنی متصل می شوند و ساختار اتصالات اصطکاکی بدون تغییر باقی می ماند. دستک ها از تسمه های ۴۰×۸ mm ساخته شده اند. برای تعریف اتصال دستک های اضافه شده به پایه بتنی از یک المان صلب افقی که حد فاصل محور بدون بعد پایه و لبه خارجی پایه (محل اتصال دستک ها) را تعریف می نماید استفاده شده است (شکل ۵). کاهش قابل توجه دورانه های ترانسفورماتور در طرح مقاوم سازی ۱ پس از نصب دستک های مورب در شکل ۸ قابل مشاهده است.

با توجه به آنکه در طرح مقاوم سازی ۱ اتصالات اصطکاکی همچنان در مسیر انتقال نیرو به پایه های بتنی قرار دارند هر گونه ضعف در مقاومت اصطکاکی می تواند موجب ناکارآمدی طرح گردد. از این رو در طرح مقاوم سازی ۲، یکی از ناودانی های زیرسری در هر طرف از وسط توسط پیچ به

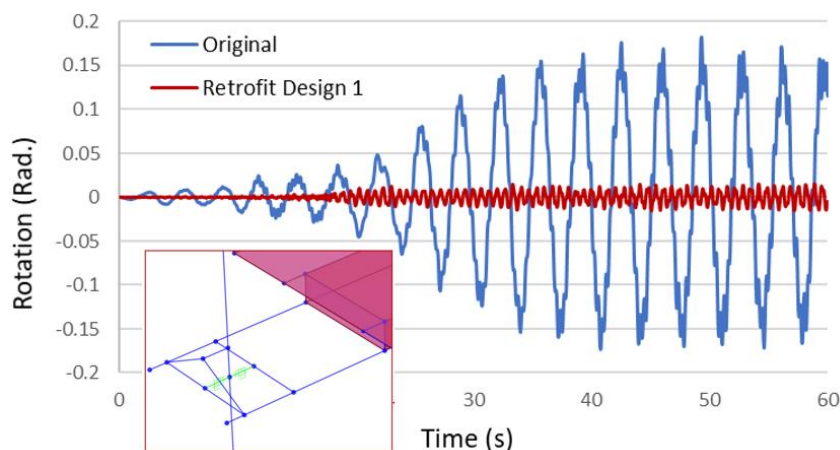
پست، حدود ۱ S) کمتر از ۹۰٪ منحنی ۱/۳ برابر طیف طرح استاندارد قرار نگیرد. ضریب مقیاس بدست آمده برای زلزله های نرمالایز شده جدول ۲ برابر ۰/۶۰ محاسبه شده است.

۶- ارزیابی عملکرد اتصالات اصطکاکی سکو

به منظور ارزیابی عملکرد لرزه ای سکوی ترانسفورماتور با اتصالات اصطکاکی، پاسخ تاریخچه زمانی غیرخطی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به تعداد زلزله های در نظر گرفته شده، مطابق ضوابط استاندارد ۲۸۰۰، طراحی بر اساس بیشترین پاسخ لرزه ای حاصل از میان زلزله ها انجام می شود. در میان چهار زلزله مورد بررسی (مذکور در بخش ۵ مقاله)، زلزله منجیل (۱۹۹۰) منجر به پاسخ لرزه ای شدیدتری، از جمله دوران های بزرگ تر در ترانسفورماتور، شده است. از این رو، در ارزیابی رفتار لرزه ای پست موردنظر، پاسخ لرزه ای غیرخطی پست هوایی تحت اثر هم زمان سه مولفه این زلزله ارائه شده است. تاریخچه زمانی دوران های ایجاد شده در تکیه گاه ترانسفورماتور تحت زلزله مذکور در شکل ۷ قابل مشاهده است.

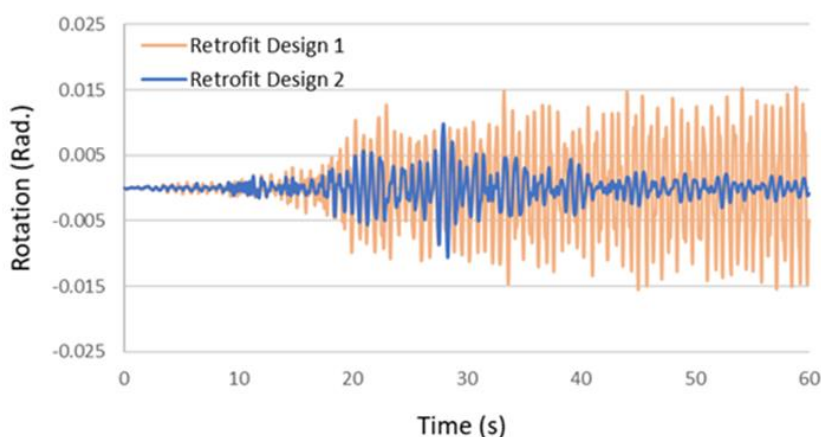
همانگونه که در شکل ۷ ملاحظه می گردد، دوران های قابل توجهی در هنگام زلزله در ترانسفورماتور ایجاد میگردد. دوران های بزرگ ترانسفورماتور می توانند سبب بروز آسیب های جدی به تجهیزات حساس داخلی و یا خارجی آن گردد.

دوران های ترانسفورماتور در شکل ۷ با فرض ثابت ماندن مقاومت



شکل ۸. کاهش دوران های ترانسفورماتور تحت زلزله منجیل در طرح مقاوم سازی ۱ (مهار سکوی ترانس با دستک های مورب)

Fig. 8. Mitigation of transformer rotations in Retrofit Design 1 (securing the platform with diagonal braces) during the 1990 Manjil Earthquake



شکل ۹. مقایسه طرح های مقاوم سازی ۱ و ۲ در کاهش دوران های ترانسفورماتور در زلزله منجیل (۱۹۹۰ میلادی)

Fig. 9. Comparison between Retrofit Designs 1 and 2 in mitigating transformer rotations during the 1990 Manjil Earthquake

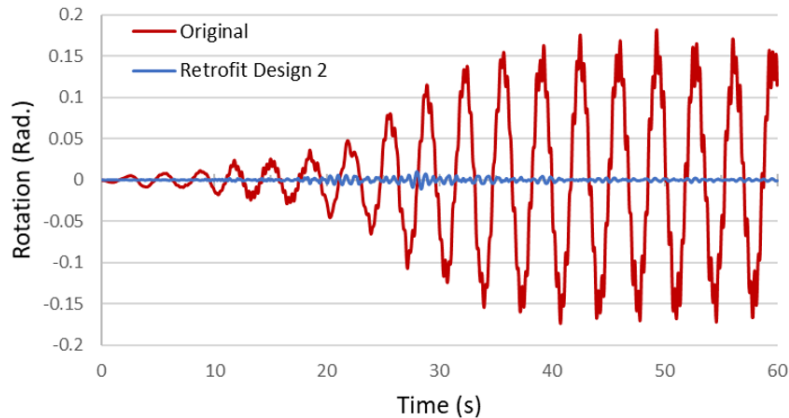
مقاوم سازی ۲ تحت اثر زلزله منجیل در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.

۷-۲- جزئیات اجرایی طرح مقاوم سازی

طرح مقاوم سازی می باید ساده و در عین حال حرفه ای باشد. منظور از سادگی سهولت اجرا، قابلیت اجرا در انواع پست های موجود، و نیز دارای توجیه اقتصادی بودن طرح است. حرفه ای بودن طرح نیز به معنای توجیه فنی، عدم نیاز به قطع برق ترانس و یا جابجایی آن در حین اجرای عملیات مقاوم سازی، و نهایتاً جزئیات بصری مطلوب اجزای الحاقی به پست هوایی

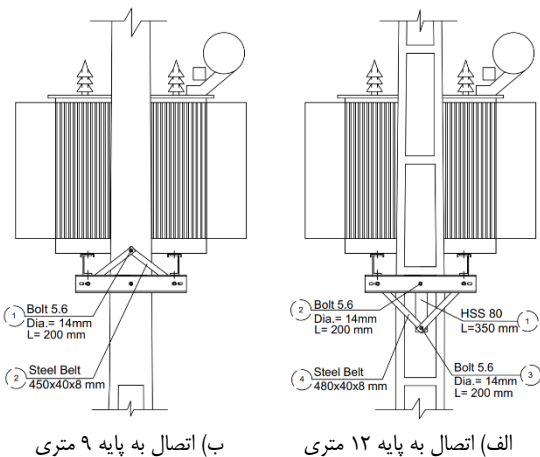
پایه بتنی متصل شده و عملاً بجای اصطکاک، انتقال نیرو به پایه توسط پیچ انجام می گیرد. این ساختار به جزئیات استاندارد اتصال سکو به پایه ها بسیار شباهت داشته و دارای پایداری استاتیکی لازم میباشد. در شکل ۹ تاریخچه زمانی دوران های ایجاد شده در تکیه گاه ترانس در دو طرح مقاوم سازی ۱ و ۲ مقایسه شده اند. همانگونه که ملاحظه می گردد، در طرح مقاوم سازی ۲ مقادیر دوران های ایجاد شده در ترانسفورماتور با کاهش بسیار قابل توجهی مواجه می شوند. وضعیت دوران های ترانسفورماتور در پست اولیه^۱ و طرح

1. Original



شکل ۱۰. کاهش دورانه‌های ترانسفورماتور در طرح مقاوم سازی ۲

Fig. 10. Mitigation of transformer rotations in Retrofit Design 2



شکل ۱۱. جزئیات مقاوم سازی اتصالات سکو به پایه های بتنی در پست هوایی مورد مطالعه

Fig. 11. Retrofit details for the platform-to-concrete-pole connection of the air post: a) connection to the 12 m pole, and b) connection to the 9 m pole

موجود می‌باشد. شکل ۱۱ جزئیات مقاوم سازی پیشنهادی اتصالات سکوی نشیمن ترانسفورماتور به پایه های بتنی در پست هوایی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جزئیات مقاوم سازی اتصال به پایه ۱۲ m در شکل ۱۱-الف ارائه شده است. در تراز سکوی ترانسفورماتور لازم است دو عدد سوراخ به قطر ۱۶ mm به فاصله حدود ۳۰ cm از یکدیگر در امتداد طول پایه در جان مقطع H شکل پایه ایجاد گردد تا امکان پیچ کردن ناودانی های زیرسری به پایه فراهم شود. در ناحیه جان فقط آرماتورهای برشی عبور کرده اند و تراکم آرماتورگذاری زیاد نیست. بنابراین، امکان ایجاد سوراخ در بتن بدون برخورد با آرماتورها میسر است. ضخامت جان مقطع بتنی پایه حدود ۷ cm تا ۸ cm سانتی متر (بسته به نوع پایه) بوده و از نظر اجرایی سوراخ کردن آن توسط دریل مخصوص به سهولت امکان پذیر است. مراحل اجرایی در مقاوم سازی اتصال سکو به پایه ۱۲ m به شرح زیر است.

گام ۱: قوطی نمره ۸ (HSS 80) بطول لازم برش داده شده و دو عدد سوراخ هم محور به قطر ۲۰ mm در دو وجه مقابل قوطی در هر یک از دو انتهای آن ایجاد می‌شوند. فاصله طولی سوراخها در این مطالعه موردی ۳۰ cm است. قوطی نمره ۸ به عنوان یک پرکننده در فضای خالی بین جان ناودانی زیرسری سکو و جان پایه بتنی مستقر می‌شود (شکل ۱۱-الف). گام ۲: سوراخی به قطر ۱۶ mm در جان مقطع پایه بتنی در امتداد سوراخ موجود در وسط ناودانی زیرسری سکو ایجاد می‌گردد. قوطی ۸ در محل خود بین ناودانی زیرسری و جان پایه بتنی قرار داده شده و بطور موقت توسط پیچ ۵٫۶ به قطر ۱۴ mm که از ناودانی زیرسری، قوطی فلزی، و جان

پایه عبور می‌نماید بسته می‌شود.
گام ۳: پس از استقرار قوطی ۸، سوراخ دوم در امتداد سوراخ موجود در قوطی در جان پایه بتنی ایجاد می‌شود (توجه: در پست مورد مطالعه با توجه به محل برجستگی پله پایه بتنی، دستک های مهاری از پایین وصل شده اند. دستک های در صورت امکان می‌توانند از بالا ناودانی زیرسری را مهار نمایند).

گام ۴: تسمه های فلزی ۸×۴۰ mm در طول لازم برش داده شده و با

۸-۲- معیارهای مقاومت و تغییر شکل

در کنترل کفایت اعضا در برابر زلزله، علاوه بر روش تحلیل طیفی، نتایج تحلیلهای تاریخچه زمانی تحت اثر چهار زلزله هم پایه شده مذکور در جدول ۲ نیز در نظر گرفته شده اند. همچنین، در کلیه تحلیلهای لرزه ای اثر مولفه قائم زلزله لحاظ شده است.

در مدلسازی اتصال سکو به ترانسفورماتور با توجه به استفاده از اتصال پیچ و مهره ای، انتقال نیرو دیگر با اتکا بر اصطکاک نخواهد بود. به همین سبب لینک های غیر خطی (آیتم ۳ در شکل ۵) با اعضای نسبتا صلب جایگزین شده اند. کار اعضای جدید در واقع تعریف بعد فیزیکی پایه بتنی در مدل است.

شکل ۱۲ نسبت های تقاضا به ظرفیت (DCR^1) اجزای سازه ای مختلف در اتصال تقویت شده سکو به پایه های بتنی را نشان می دهد. براساس خروجی های نرم افزار دستک های مهاری و سایر اجزای سکوی نشیمن دارای ظرفیت نیرویی لازم در تحمل تقاضای نیروهای وارده را دارا می باشند. بحرانی ترین عضو با نسبت $DCR = 0.86$ متعلق به یکی از تسمه های فلزی 40×8 mm اتصال سکو به پایه ۱۲ متری است که از تحلیل تاریخچه زمانی تحت اثر زلزله منجیل در ترکیب با $1/3$ برابر بارمرده و 0.2 بار برف بدست آمده است. هر سه مولفه زلزله هم پایه شده منجیل در این تحلیل به پست هوایی وارد شده و مولفه عرضی زلزله مذکور در امتداد محور X (در صفحه پست) اثر نماید. در همین ترکیب بار بزرگترین مقادیر ضرایب DCR در پایه های بتنی ۱۲ m و ۹ m به ترتیب 0.59 و 0.62 محاسبه شدند.

با انجام محاسبات دستی کفایت پیچ های نمره ۱۴ با کنترل تنش های برشی و خمشی بیشینه حاصل در آنها مورد تایید قرار گرفت. همچنین، تنش های لهدگی ایجاد شده در بتن در تماس با پیچ نمره ۱۴ نیز کنترل شدند. در انتهای این بخش بیشینه دوران های ترانسفورماتور حول محور X (دوران های خارج از صفحه پست) به ازاء زلزله های مختلف ارزیابی می گردد. برای این منظور زلزله ها بدون اعمال ضرایب اهمیت، I و رفتار، R ، در نظر گرفته شده اند. همانگونه که مشاهده می شود، بیشینه دوران های ایجاد شده در ترانسفورماتور حدود 0.15 rad است که در زلزله سرپل ذهاب رخ داده است. کوچک بودن دوران های ترانسفورماتور به معنای حفظ پایداری آن در طی زلزله می باشد.

اندازه گیری در محل نصب، فاصله سوراخ های لازم در دو انتهای آنها تعیین و سپس سوراخ می شوند.

گام ۵: پیچ های 14 mm که موقت بسته شده بودند باز می شوند و قوطی نمره ۸ برداشته می شود. سوراخ های تعبیه شده در پایه توسط فشار باد تمیز شده و توسط رزین اپوکسی پر می شوند. قوطی ۸ در محل خود قرار گرفته و پیچ 14 mm اول بسته می شود. بدلیل آغشته بودن سوراخ به اپوکسی حرکت پیچ بداخل سوراخ باید همراه با چرخش های چپ و راست پیچ باشد تا هوا در ماده اپوکسی محبوس نشود. پس از عبور کامل پیچ از سوراخ با واشر و مهره از وجه پشتی پایه بسته می شود. با تنظیم سوراخ تحتانی تسمه ها، پیچ 14 mm دوم نیز به روشی مشابه با پیچ اول تعبیه شده و توسط واشر و مهره از وجه پشتی پایه بسته می شود. در نهایت، تمامی پیچ ها سفت می شوند.

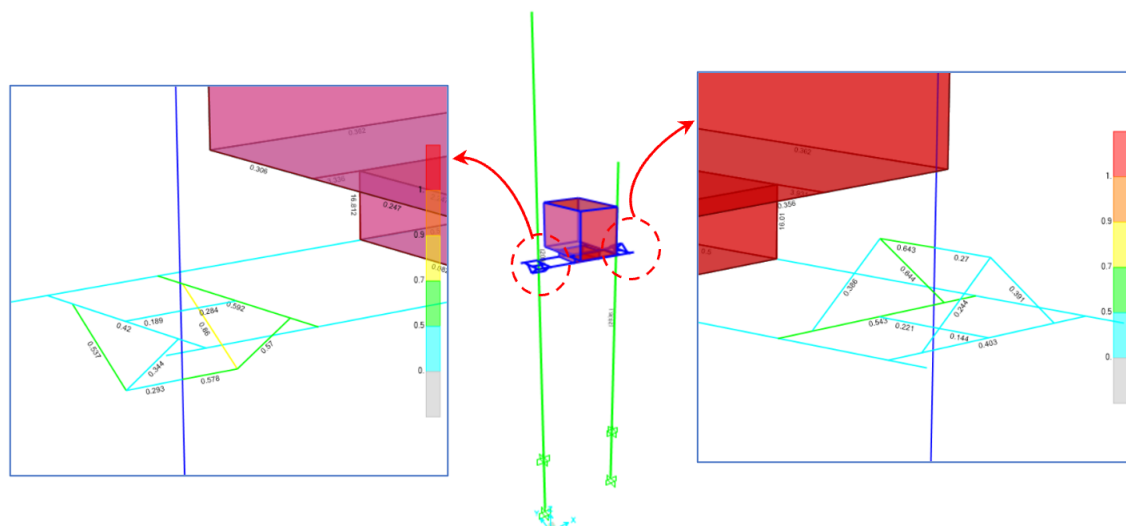
جزئیات مقاوم سازی اتصال سکوی ترانس به پایه ۹ m در شکل ۱۱-ب نشان داده شده است. با توجه به آنکه سکو در ناحیه چهارگوش پایه قرار گرفته است سوراخ های از پیش تعبیه شده متعددی جهت مهار ناودانی های زیرسری سکو در اختیار می باشد. طبق شکل ۲-ب ناودانی زیر سری به پایه پیچ شده است. بنابراین کار مقاوم سازی اتصال محدود به تهیه و نصب دو عدد تسمه فلزی 40×8 mm به طول مورد نیاز است.

۸-۱- ارزیابی پست مقاوم سازی شده

۸-۱- بارگذاری

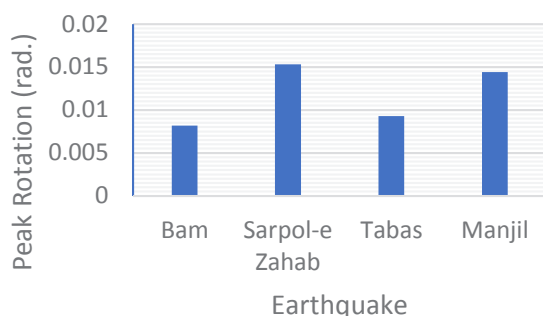
در تحلیل پست مقاوم سازی شده ترکیبات مختلف بارهای مرده (D)، برف (W)، و زلزله (E) در نظر گرفته شده اند.

علاوه بر وزن اعضای سازه ای، بار مرده ناشی از وزن سیم های هادی متصل به پایه نیز می باید در محاسبات در نظر گرفته شود. سیم ها که به پایه بلندتر پست متصل می شوند، در محل اتصال خود نیروهای افقی و قائمی را بر پایه وارد می نمایند. با توجه به آنکه پست مورد نظر در میانه خط قرار داشته و هر دو دهانه طرفین آن با یکدیگر تقریباً یکسان و برابر 50 m است، مولفه های افقی یکدیگر را متعادل نموده و فقط مولفه قائم وزن سیم های هادی به پایه 12 m اثر می نماید. در فصول یخبندان علاوه بر وزن سیم ها، اضافه وزن ناشی از یخ زدگی سطح جانبی آن ها را هم باید در محاسبات در نظر گرفت. کل بار قائم ناشی از وزن سیم های وارده بر پایه 12 m برابر 231 kgf و اضافه بار وارده در فصول یخبندان (بار برف) برابر 231 kgf محاسبه شده است [۲۰]. یک سوم این بار در نوک پایه و دو سوم بقیه در تراز یک متر پایین تر از نوک پایه بر آن وارد می شوند.



شکل ۱۲. نسبت تقاضا به ظرفیت اجزای سکوی اتصال پس از مقاوم سازی

Fig. 12. The demand-to-capacity ratio of platform components after retrofitting



شکل ۱۳. بیشینه دوران های لرزه ای ترانسفورماتور پس از مقاوم سازی

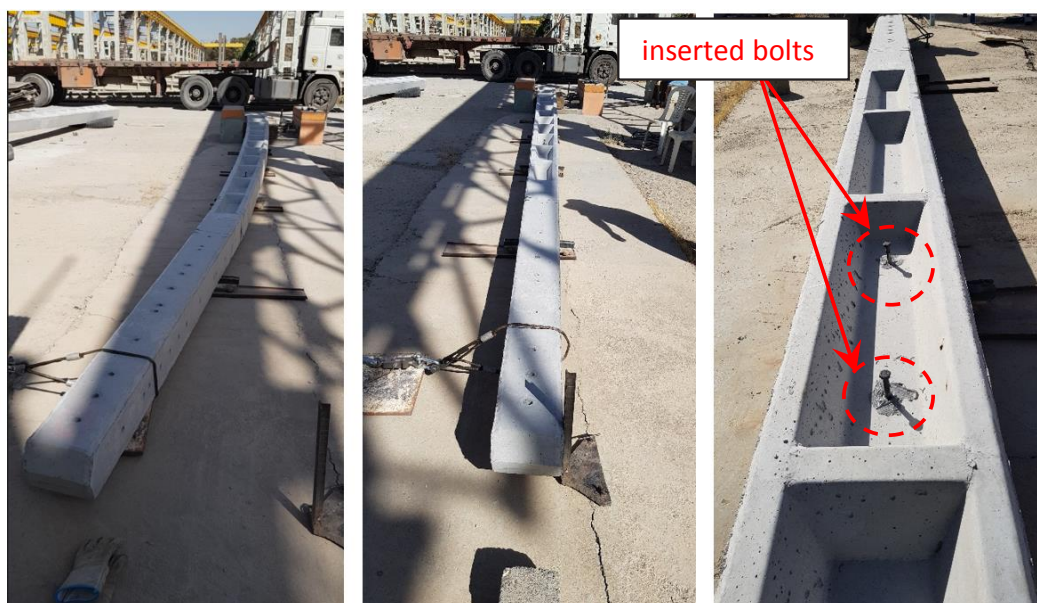
Fig. 13. The peak seismic rotations of the transformer after retrofitting

۹- بررسی آزمایشگاهی تاثیر کاشت بولت در مقاومت و مود شکست پایه بتن آرمه

در طرح مقاوم سازی سکوی پست های هوایی مورد مطالعه، تعبیه حداکثر دو سوراخ در جان پایه بتنی جهت اتصال سکو به پایه توسط بولت پیش بینی شده است. سوراخ های مذکور پس از تزریق چسب اپوکسی محل عبور پیچ نمره ۱۴ جهت اتصال ناودانی و یا دستک های مهاری به پایه بتنی خواهند بود. در دستورالعمل های اجرایی موجود، پیمانکاران از هرگونه سوراخکاری پایه های بتنی که می تواند منجر به تضعیف پایه شود منع شده اند. به همین جهت، لازم بود قبل از اجرای عملیات مقاوم سازی، نسبت به عدم تضعیف پایه بتنی در اثر سوراخکاری و کاشت پیچ اتصال بطریق تجربی آزمایش شود. به منظور ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر سوراخ ها در مقاومت پایه های بتنی، سوراخ های مورد نظر در یکی از پایه های بتنی ۱۲/۴۰۰ (پایه شماره ۱) ایجاد و پس از تزریق چسب، بولت های اتصال نیز در آن تعبیه شدند. پس از گذشت ۸ روز از تزریق، زمانیکه چسب اپوکسی به اندازه کافی سخت شد، آزمایشات استاندارد بارگذاری پایه ها (آزمایش کشش پایه ها) بر روی پایه مورد نظر و نیز یک نمونه شاهد (پایه شماره ۲، پایه بتنی ۱۲/۴۰۰ دیگر با تاریخ تولید یکسان با پایه مورد نظر) انجام گرفت. بر اساس نتایج آزمایشات انجام شده، وضعیت ایجاد ترکها در بتن و نیز نیروهای کششی نظیر حد ارتجاعی و مقاومت نهایی هر دو پایه مورد قبول قرار گرفت. تعبیه سوراخ ها در پایه بتنی نه تنها در رفتار سازه ای و مقاومت پایه بلکه در مود

شکست پایه نیز بی تاثیر ارزیابی شد. گزارش تصویری پیچ های کاشته شده در جان پایه (در محل سومین چشمه از بالا)، و نیز آزمایش کشش انجام شده بر روی پایه در شکل ۱۴ قابل مشاهده است.

در پایه شماره ۱ نیروی کشش نهایی نظیر گسیختگی 1750 kgf اندازه گیری شد که حدود ۴۶٪ بزرگتر از نیروی گسیختگی مورد انتظار، یعنی 1400 kgf بود. ضمناً، مود شکست پایه تشکیل چند ترک خمشی و یک ترک خمشی برشی در محل تغییر مقطع عرضی پایه از مستطیل به H شکل در فاصله ۳ m از انتهای پایه بود (شکل ۱۵). در چشمه ای که



الف) پیچ های کاشت شده در چشمه سوم ب) پایه آماده آزمایش پ) وضعیت پایه در پایان آزمایش

شکل ۱۴. بررسی آزمایشگاهی تاثیر کاشت پیچ در جان پایه بتنی شماره ۱ بر مقاومت و مود شکست پایه

Fig. 14. Experimental evaluation of the influence of bolts inserted into the web of the Pole #1 on its strength and failure mode: a) bolts inserted in the third panel, b) pole ready for testing, and c) pole at the end of testing



شکل ۱۶. مود گسیختگی پایه بتنی شماره ۲ (نمونه شاهد) تحت اثر نیروی کشش نهایی

Fig. 16. Failure mode of Concrete Pole #2 (the reference specimen) at the ultimate tension load



شکل ۱۵. مود گسیختگی پایه بتنی شماره ۱ تحت اثر نیروی کشش نهایی

Fig. 15. Failure mode of Concrete Pole #1 at the ultimate tension load

۱۰- عملیات اجرایی مقاوم سازی پست هوایی

در این بخش تصاویر پست هوایی مورد مطالعه پس از مقاوم سازی اتصالات سکوی ترانسفورماتور آن از زوایای مختلف ارائه شده است (شکل های ۱۷ و ۱۸). تصاویر مراحل مختلف اجرای مقاوم سازی در مرجع [۲۰] ارائه شده اند. قوطی های قائم که حفاصل جان پایه بتنی تا لبه بال های آن را پر کرده اند و تسمه های فلزی مورب اتصال پیچ و مهره ای سکوی ترانسفورماتور به پایه های بتنی را ایجاد نموده اند. این جزئیات مطابق با

پیچ های فولادی کاشته شده بودند، هیچگونه خرابی مشاهده نشد. بنابراین، کاشت پیچ ها تاثیری در مقاومت نهایی پایه و مود شکست آن نداشته است. پس از آزمایش پایه مورد نظر، پایه شماره ۲ بعنوان نمونه شاهد مورد آزمایش قرار گرفت که نیروی کشش نهایی آن 1880 kgf اندازه گیری شد که حدود ۷٪ بیشتر از نیروی نظیر در پایه شماره ۱ بود. مود شکست پایه شماره ۲ تشکیل یک ترک خمشی برشی در مرز بین چشمه های دوم و سوم از بالای پایه بود (شکل ۱۶).



شکل ۱۷. نمای شمال غربی پست هوایی مقاوم سازی شده

Fig. 17. The north-west view of the retrofitted aerial station



شکل ۱۸. نمای جنوب شرقی پست هوایی مقاوم سازی شده

Fig. 18. The south-east view of the retrofitted aerial station

تری نسبت به مقاوم سازی ترانسفورماتورهای هوایی اقدام نماید. جزییات اجرایی ساده و در عین حال موثر و کاربردی نشان داده شده در شکل های فوق به جزییات استاندارد اتصال پیچ و مهره ای سکو به پایه های بتنی یعنی جزییات استاندارد وزارت نیرو (شکل ۱) نزدیک تر می شود. روش ابداعی این مقاله می تواند در مقاوم سازی بسیاری از پست های هوایی کشور که بدلیل کاربرد اتصالات غیر استاندارد اصطکاکی فاقد ایمنی لرزه ای لازم هستند، بکار رود. در این خصوص، پست های هوایی ساختمان های با اهمیت بالا می باید در اولویت قرار داده شوند.

طرح مقاوم سازی ارائه شده در شکل ۸ اجرا شده اند. همانگونه که ملاحظه می گردد، عملیات مقاوم سازی ضمن سادگی بصورت حرفه ای و با احتراز از هرگونه وصله پینه کاری انجام شده است، بطوریکه ضمن ارتقای تاب آوری لرزه ای تجهیز، احساس نامطلوبی را در شهروندان ایجاد نمی نماید. عملیات مقاوم سازی بدون نیاز به قطع برق و خارج کردن ترانسفورماتور از مدار حدود ۳ ساعت بطول انجامید. یکی از دلایل طولانی شدن، یکبار سفر به کارگاه تراشکاری پس از اندازه گیری فواصل مورد نیاز برای انجام سوراخکاری تسمه ها و پروفیل های ناودانی بود. قدر مسلم یک تیم حرفه ای مجهز به ابزار آلات مورد نیاز می تواند در مدت زمان به مراتب کوتاه

۱۱- نتیجه گیری

در اکثر قریب به اتفاق پست های هوایی دوپایه موجود، در تراز استقرار سکوی ترانسفورماتور سوراخ های لازم جهت اجرای اتصالات استاندارد- یعنی پیچ و مهره کردن سکو به پایه بلندتر پست (پایه ۱۲ m)- پیش بینی نشده است. به همین جهت، بارهای ثقیل و جانبی ترانسفورماتور بوسیله اصطکاک از ناودانی های زیرسری سکو به پایه های بتنی منتقل می شوند. در مقاله حاضر نا ایمن بودن اتصالات اصطکاکی حتی با فرض ثابت باقی ماندن مقاومت اصطکاکی بین سطوح در طول زلزله از طریق تحلیل های تاریخچه زمانی غیر خطی به اثبات رسید. جزییات اجرایی ساده و درعین حال حرفه ای جهت مقاوم سازی اتصالات اصطکاکی سکو به پایه های بتنی ارائه و کیفیت آن توسط مدلسازی کامپیوتری مورد ارزیابی و تایید قرار گرفت. جزییات اجرایی ارائه شده قابل کاربرد در مقاوم سازی بسیاری از پست های هوایی موجود می باشد. در خصوص پست های هوایی جدید، توصیه می گردد هندسه پایه های ۱۲ m بگونه ای اصلاح شود تا سوراخ های لازم در فاصله ۴ m تا ۵ m از انتهای پایه امتداد یابد تا بتوان به سهولت در تراز استقرار ترانسفورماتور، سکو را توسط پیچ و مهره به پایه متصل نمود.

۱۲- قدردانی

بدینوسیله از حمایت مالی شرکت توزیع برق منطقه ای استان کرمانشاه از پژوهش حاضر در قالب قرارداد پژوهشی شماره ۹۸/د/۷۶۵ قدردانی بعمل می آید.

منابع

- [4] Preliminary Report on the Identification of the Bam Earthquake of December 26, 2003. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (2003), Tehran, Iran (In Persian).
- [5] Preliminary Report on the Earthquake of November 12, 2017, Sarpol-e Zahab, Kermanshah Province with a Moment Magnitude of 7.3. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (2017), Tehran, Iran (In Persian).
- [6] Oboudi, M. H., & Mohammadi, M. (2024). Two-stage seismic resilience enhancement of electrical distribution systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 241, 109635.
- [7] Liu, J., Meng, X., Tian, L., Jin, Q., Dong, Y., Yang, M., & Liu, K. (2024). Failure mechanisms and seismic fragility analysis of overhead transmission lines incorporating pile-soil-structure interaction. *Engineering Failure Analysis*, 160, 108201.
- [8] Mahmoudi M., Ghasemi A., and Tavousi Tafreshi S. (2023). Evaluation of the seismic performance of isolated electrical transformers under pulse-like excitations, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54 (10), p. 4007-4034.
- [9] Liu, X., Xie, Q., Liang, H., & Zhu, W. (2023). Seismic resilience evaluation and retrofitting strategy for substation system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 153, 109359.
- [10] Zeynalian M. and Zamani M. (2018). Structural behaviour of concrete poles used in electric's power distribution network, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4(4), p. 29-41.
- [11] Motaei Y., and Akashe B. (2015). Earthquake hazard in Tehran and the study of failure moods of power distribution equipment during earthquake, *Journal of New Research in Seismology, JNRS*, 10(35), p. 5-8 (In Persian).
- [12] Publication 375 - Management and Planning Organization of Iran (2007), Tehran, Iran (In Persian).
- [13] Standard for Aerial Distribution Lines - Cross Arms and
- [1] Jafari, M.A., Rahnavard, A., Zekavati, A.A. (2011). Vulnerability of Aerial Transformers in Earthquakes and Their Retrofit Solutions, 26th International Power System Conference, Tehran, Iran (In Persian).
- [2] Schiff, A. J., & Schiff, A. (1998). Guide to improved earthquake performance of electric power systems. Gaithersburg, MD, USA: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.
- [3] Zekavati A., Jafari. M.A., and Rahnavard A. (2015). Performance assessment of power distribution network in 2013 Bushehr, Iran Earthquake, in 7th International Conference on Seismology & Earthquake Engineering (IIEES), Tehran, Iran.

- of steel on concrete or grout. *Journal of Structural Engineering*, 111(3): p. 505-515.
- [18] Guidelines for Seismic Evaluation of Substation Facilities, Publication 315. Deputy of Planning and Strategic Supervision of the President - Strategic Supervision Deputy - Technical Executive System Office (2009), Tehran, Iran (In Persian).
- [19] Guidelines for Seismic Evaluation and Retrofit of Power Supply Systems, Publication No. 607, 2012, Vice Presidency for Planning and Strategic Supervision – Strategic Supervision Deputy – Technical Affairs System (In Persian).
- [20] Toopchi-Nezhad, H. (2021). Study, Review, and Determination of Methods for Retrofitting Structures of Aerial Substations, Ground Substations, and Electrical Equipment Against Natural Disasters, Research Project Report No. 765/D/98, Kermanshah Province Electricity Distribution Company, Research Deputy of Razi University (In Persian).
- Pole Arrangements Used in the Distribution Network. Ministry of Energy - Tavanir Company - Research and Technology Deputy - Standards Office - Volume 6 (1998), Tehran, Iran (In Persian).
- [14] Guidelines for Determining Requirements, Technical Evaluation Criteria, and Tests for Reinforced Concrete Square Poles. Tavanir Company, Distribution Coordination Deputy, Technical and Engineering Distribution Office, Concrete Poles Specialized Committee, 3rd Edition (2017), Tehran, Iran (In Persian).
- [15] Standard for Aerial Distribution Lines (Standard 51-1), Design Principles and Practical Tables. Ministry of Energy - Tavanir Company - Research and Technology Deputy - Standards Office - Volume 1 (1999), Tehran, Iran (In Persian).
- [16] Building Design Code for Earthquake Resistance (Standard 2800) - 4th Edition. Road, Housing, and Urban Development Research Center (2014), Tehran, Iran (In Persian).
- [17] Rabbat, B. and Russell, H. (1985). Friction coefficient

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Toopchi-Nezhad, *Enhancing the Seismic Resilience of Aerial Substations: A Case Study of a Mid-Line Two-Pole 315 kVA Transformer*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 57(4) (2025) 695-714.

DOI: [10.22060/ceej.2025.23376.8154](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.23376.8154)

