

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

حمید تویچی نژاد

دانشیار سازه، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه ۶۷۱۴۴-۱۴۹۷۱، ایران
h.toopchinezhad@razi.ac.ir

چکیده

تجربه زلزله های گذشته نشان داده که ترانسفورماتورهای موجود در پست های هوایی از جمله تجهیزات آسیب پذیر در خطوط توزیع نیرو می باشند. لرزش و دوران های قابل توجه ترانسفورماتورها در هنگام زلزله منجر به آسیب دیدن ملحقات ترانسفورماتور (همانند بوشینگ ها) و اتصالات سکوی نشیمن آن، و نهایتاً لغزش یا واژگونی ترانسفورماتور می گردد. در غالب پست های هوایی موجود یک و یا هردو 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 ۳۱۵kVA واقع در میانه خط توزیع مطالعه شده است. براساس تحلیل های تاریخچه 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.

واژگان کلیدی: پست های هوایی، سکوی ترانسفورماتور توزیع، تاب آوری، پایه بتنی، مقاوم سازی لرزه ای

۱. مقدمه

یکی از متداول ترین مودهای 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 میگردد [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، پست‌های هوایی دچار آسیب‌های جدی شدند که شناخته‌شده‌ترین مورد آن مربوط به پست هوایی مجتمع مسکن مهر در محله فولادی این شهر بود. مطالعات متعددی در ادبیات تحقیق پیرامون ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سامانه‌های توزیع نیرو موجود است. این مطالعات طیف گسترده‌ای از موضوعات را پوشش می‌دهند، از جمله ارتقای تاب‌آوری لرزه‌ای سامانه‌های توزیع برق [۶]، بررسی مکانیزم‌های خرابی و تحلیل شکنندگی لرزه‌ای خطوط انتقال هوایی با لحاظ تعامل شمع-خاک-سازه [۷]، ارزیابی رفتار لرزه‌ای ترانسفورماتورهای زمینی [۸] و بررسی تاب‌آوری لرزه‌ای و تدوین استراتژی مقاومت‌سازی سیستم پست برق [۹].

در مقابل، در زمینه پست‌های هوایی رایج در کشور، تحقیقات علمی محدودی انجام شده است. به‌عنوان نمونه، در مرجع [۱۰]، رفتار سازه‌ای پایه‌های بتن‌آرمه بررسی شده است. با این حال، درباره موضوع خاص این مقاله، یعنی ارزیابی اتصال سکوی ترانسفورماتور به پایه‌های بتنی در پست‌های هوایی، مقالات منتشره بسیار محدود هستند. جعفری و همکاران [۱۱]، با تحلیل دینامیکی یک پست هوایی دوطایه، مقاومت پیچشی ضعیف اتصال سکو به ترانسفورماتور را به‌عنوان نقطه ضعف اصلی شناسایی کرده و جزئیاتی برای مقاومت‌سازی این اتصال ارائه داده‌اند. ذکاوتی و همکاران [۳]، در ارزیابی خسارات وارده به شبکه‌های توزیع ناشی از زلزله ۱۳۹۲ بوشهر، دوران بیش از حد ترانسفورماتورهای مستقر در پست‌های هوایی را به‌عنوان عامل اصلی خسارت شناسایی کرده و عملکرد مناسب جزئیات اتصال استاندارد (اتصال پیچ و مهره‌ای دارای دستک‌های مهارتی) را با تحلیل‌های اجزا محدود تأیید کرده‌اند. همچنین، مطاعی و عکاشه [۱۱]، با بررسی خطر خرابی شبکه‌های توزیع تهران، شکست یا لق شدن اتصالات سکوی ترانسفورماتور در هنگام ارتعاشات لرزه‌ای را به‌عنوان مود خرابی غالب در پست‌های هوایی ارزیابی

کرده‌اند. در مقاله حاضر با مطالعه موردی یک پست هوایی دوطایه واقع در میانه خط، رفتار لرزه‌ای آن ارزیابی شده است. اتصال سکوی ترانسفورماتور به پایه‌های بتنی پست مشابه جزئیات اجرایی متداولی است که در بسیاری از مناطق کشور دیده می‌شوند. در پژوهش حاضر ضمن ارزیابی عملکرد لرزه‌ای جزئیات اتصال سکوی ترانسفورماتور پست به پایه‌های بتنی و تبیین نقاط ضعف فنی موجود در آن، جزئیات اجرایی بدیعی جهت مقاوم سازی لرزه‌ای آن ارائه شده است. نوآوری مقاله حاضر در شناسایی و تبیین نواقص فنی موجود در جزئیات اجرایی متداول بسیاری از پست‌های هوایی کشور و ارائه روشی بدیع برای مقاوم‌سازی نهفته است. این روش بر دو اصل کلیدی "سادگی" و "حرفه‌ای بودن" استوار است. اصل سادگی به این معناست که طرح پیشنهادی مقاوم‌سازی فاقد پیچیدگی‌های اجرایی بوده و نیازمند تجهیزات پرهزینه نیست. اصل حرفه‌ای بودن نیز بر انسجام و ظرافت فنی در تمامی جزئیات طرح تأکید دارد، به‌گونه‌ای که از هرگونه عدم تطابق یا طراحی نامتوازن جلوگیری شده است. در انتها رفتار پست مقاوم سازی شده توسط تحلیل‌های تاریخچه زمانی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲. طرح مساله و شناخت عوامل آن

براساس نشریه ۳۷۵ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور (مرجع [۱۲]) و نیز استاندارد خطوط هوایی توزیع شرکت توانیر (مرجع [۱۳])، سکوی نشیمن فلزی ترانسفورماتورهای هوایی دو پایه می‌باید به هریک از پایه‌های بتنی توسط پیچ و مهره متصل شود. سکوی نشیمن متشکل از دو ناودانی بلند است که از هرطرف توسط یک زوج ناودانی زیرسری به پایه بتنی پیچ می‌شوند. ضمناً پایداری استاتیکی مجموعه سکو و ترانسفورماتور در برابر بارهای جانبی و یا هرگونه خروج از مرکزیت بارهای ثقلی توسط تسمه‌های موری که از یک انتها به پایه بتنی و از انتهای دیگر به ناودانی‌های زیرسری پیچ شده‌اند تأمین می‌شود (شکل ۱).



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

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

ای انتقال نیروهای زلزله از طریق اصطکاک را ایمن و مجاز نمی‌شمارد. بنابراین، جزئیات اتصال سکوی نشیمن به پایه کوتاه تر پست ایمن ارزیابی نمی‌شود. شکل ۲-ب نمای نزدیک اتصال نشیمن ترانسفورماتور به پایه بلندتر آن را نشان می‌دهد. در این اتصال مسیر انتقال نیروهای ثقلی ناشی از وزن ترانسفورماتور و نیز کوپل کشش و فشار ناشی از لنگرهای وارده در هنگام زلزله تنها از طریق اصطکاک بین ناودانی‌های زیرسری و ناودانی‌های مهار تامین شده است. مهره‌ها معمولاً بصورت دستی توسط کارگر سفت میشوند و اصولاً میزان کشش حاصل در پیچ‌ها و در نتیجه فشار عمودی موثر بر سطح تماس ناودانی و پایه مقادیر کنترل شده‌ای ندارد. بنابراین، این نوع اتصال ماهیتاً غیرایمن ارزیابی می‌گردد. اتصال ناودانی‌های زیرسری به پایه‌ها بدون کاربرد پیچ و مهره و نیز عدم اجرای دستک‌های مهار استاندارد در مهار لنگرهای وارده بر اتصال از جمله نواقص اصلی این اتصال محسوب میشوند. قرار گرفتن سکوی ترانسفورماتور در تراز نامناسب یکی از اصلی‌ترین دلایل بروز نواقص مذکور و ندانم کاری در جزئیات اجرایی اتصال شده است.

۴. مدل سازی پست هوایی

شکل ۲-ب نمای نزدیک اتصال نشیمن ترانسفورماتور به پایه کوتاه تر آن را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد ناودانی‌های کوتاه تر عمود بر نشیمن- که به عنوان زیرسری ناودانی‌های بلند عمل می‌نمایند- توسط پیچ و مهره به پایه بتنی متصل شده‌اند. 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 تکیه‌گاه مهار شوند تا پایداری ترانسفورماتور تامین گردد. لنگرهای مذکور بصورت کوپل کشش و فشار در محل اتصال ناودانی‌های بلند به ناودانی‌های زیرسری وارد می‌گردند. به عنوان یک نقیصه جدی، دستک‌های مورب (تسمه‌های به عرض ۵۰mm و ضخامت ۷mm) در اتصال نشان داده شده در شکل ۲-ب حذف شده‌اند و بجای آن‌ها ناودانی‌های مهار نشان داده شده در شکل تعبیه شده‌اند. بنابراین، کوپل کشش و فشار وارده بر ناودانی‌های زیرسری می‌باید توسط ناودانی‌های مهار زیرین از طریق اصطکاک به پایه بتنی منتقل گردد. با توجه به پیچ نشدن ناودانی‌های زیرسری به ناودانی‌های مهار امکان انتقال کوپل کششی بین آن دو غیر ممکن است. علاوه بر آن، هیچ آیین نامه

۴.۱. مدل سازی پایه های بتن آرمه

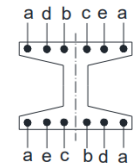
پایه های بتن آرمه دارای مقاطع عرضی غیرمنشوری با تغییرات خطی ابعاد هندسی در طول پایه می باشند. مقطع عرضی پایه از ته آن تا فاصله ۳ متری از راس انتهایی بصورت H شکل بوده و در ۳ متر انتهایی مستطیل شکل می باشد. در ناحیه ۳ متر انتهایی شبکه ای از سوراخ

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.

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)



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" 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.

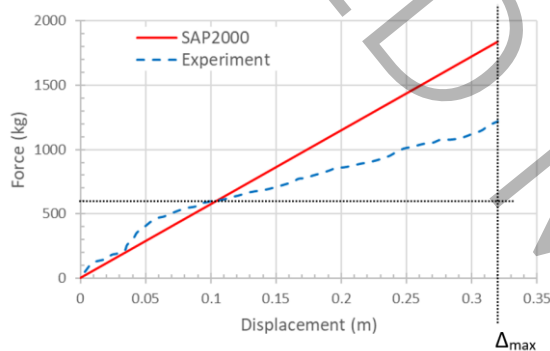
۴.۲. ضریب رفتار، R، پایه ها

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 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 تغییرشکل 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

این حد را می توان مقاومت طراحی پایه، F_D در نظر گرفت. مقاومت نهایی پایه، F_u طبق آزمایش معادل kgf ۱۲۰۰ است. در این حد از نیرو، بر اساس نتایج آزمایش جابجایی بیشینه حاصل در راس پایه، $\Delta_{\max}$ برابر m ۰٫۳۲ اندازه گیری شده است [۱۰]. نیروی نظیر این جابجایی در مدل ارتجاعی پایه $F_e = 1837 \text{ kgf}$ می باشد. این نیرو حدود سه برابر نیروی حد ارتجاعی پایه (kgf ۶۰۰) 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 (kgf ۶۰۰) 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 تحلیلهای ارتجاعی خطی منطقی است.



شکل ۴- مقایسه نتایج تحلیل خطی (مدل SAP2000) و رفتار غیرخطی (نتایج آزمایشگاهی [۱۰]) پایه ۱۲/۴۰۰

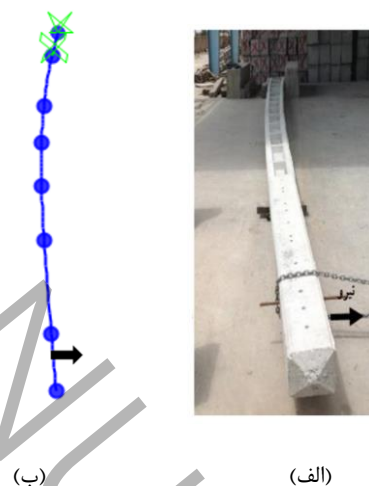
Fig. 4. Comparison of linear analysis results (SAP2000 model) and nonlinear behavior (laboratory test results [10]) for pole 400/12.

۴.۳. مدل سازی ترانسفورماتور

هدف این پژوهش ارزیابی رفتار سازه ای پایه ها و سکوی نشیمن ترانسفورماتور می باشد. بنابراین، مدل سازی جزئیات سازه ای بدنه، هسته و سیم پیچ ترانسفورماتور هدف این تحقیق نیست. ترانسفورماتور و کلیه ملحقات آن طبق استاندارد IEC 60076^۲ باید طوری طراحی شده باشد که شتاب های وارده تا $g/3$ را بدون هرگونه صدمه ای تحمل نماید [۱۲]. بنابراین، با فرض استفاده از

گونه ترکی مشاهده نگردد. عملکرد پایه در سطح مقاومت مرحله ارتجاعی (kgf ۶۰۰) 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 ۴۰۰-۱۲، پایه تا kgf ۱۲۰۰ به حد گسیختگی نرسد.

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 ۴۰۰/۱۲ بدست آمده از آزمایش [۱۰] و نیز نتایج شبیه سازی فرآیند آزمایش توسط مدل خطی پایه (خروجی های تحلیل SAP2000) را نشان می دهد.

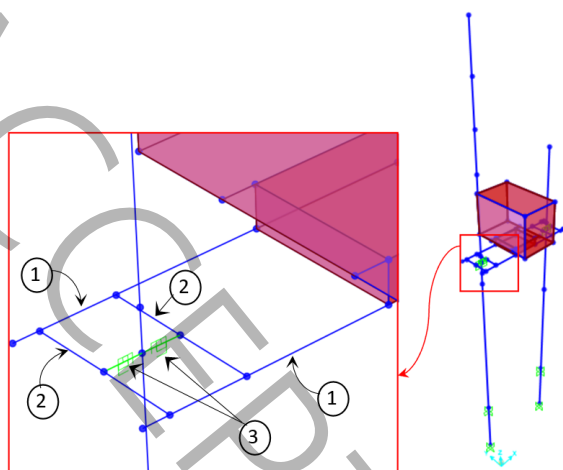


شکل ۳- الف) آزمایش پایه ۴۰۰/۱۲ [۱۰]، ب) شبیه سازی آزمایش در نرم افزار SAP2000

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

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، kgf ۶۰۰ بدست آمده از آزمایش را نشان می دهد.

² International Electrotechnical Commission



شکل ۵. مدلسازی پست هوایی و اتصالات اصطکاکی سکوی ترانسفورماتور به پایه ها 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

اجزای سازه ای سکوی ترانس نیز توسط ناودانی های نمره ۱۴ (ناودانی های بلند) و ناودانی های کوتاه نمره ۱۲ (ناودانی های زیر سری) مدل شده اند. اتصال اتکایی ناودانی های کوتاه با پایه های بتنی توسط لینک غیرخطی با مدل چندخطی خمیری^۴ دارای حلقه های هیستریزس ایزوتروپیک مدلسازی شده است. تخمین مقاومت پیچشی اتصال اصطکاکی سکو به ترانس بدلیل تنوع نحوه اجرا، یکنواخت نبودن میزان سفت شدگی دستی پیچ ها در پست های مختلف، و عدم کاربرد تجهیزات کالیبره شده ای همانند ترکمر 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 1355 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 339 kgf برآورد می گردد. با فرض ضریب اطمینان ۳ در برابر لغزش تحت بارهای ثقلی (وزن ترانس)، مقاومت اصطکاکی در هر

ترانسفورماتورهای استاندارد در پست های 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 315 kVA به وزن 1355 kgf و ابعاد پلان $1560 \times 970 \text{ mm}$ و ارتفاع کل تا بالای مخزن ذخیره روغن 1543 mm است. در مدل کامپیوتری ترانسفورماتور به شکل حجم مکعبی متناسب با ابعاد فیزیکی آن تعریف شده است. جداره های حجم تعریف شده برای ترانسفورماتور توسط المانهای پوسته ای ضخیم^۳ از جنس فولاد با ضخامت 18.23 mm مدل شده اند تا با توجه به حجم تعریف شده برای ترانسفورماتور در مدل، جرم کل و موقعیت مرکز جرم آن را با دقت شبیه سازی نماید.

۴.۴. سکوی نشیمن و اتصال آن به پایه ها

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 می دهد. نشیمن گاه ترانسفورماتور پست دارای دو ناودانی بلند نمره ۱۴ (آیتم ۱) است که بر روی ناودانی های زیرسری (آیتم ۲) قرار گرفته و پیچ میشوند. با توجه به آنکه پایه های بتنی پست توسط المان های خطی بدون بعد در نرم افزار تعریف شده اند، ناودانی های زیرسری با فاصله ای برابر با بعد مقطع عرضی پایه در تراز نشیمن گاه ترانسفورماتور تعریف شده اند. در مدل نرم افزار ناودانی های بلند (آیتم ۴) در تمام طول خود پیوسته بوده و ناودانی های زیرسری در دو انتهای خود به آن ها توسط اتصال مفصلی متصل شده اند.

⁴ Multilinear plastic

³ Thick Shell

تکیه گاه در برابر لغزش و دوران به ترتیب 20 kN و 3 kN.m محاسبه می شود.

۵. اثرات ساختگاهی و بارگذاری زلزله

در این پژوهش با توجه به مشارکت مودهای 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 می شوند. 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 می شود. 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 مودهای گسیختگی پایه ها و سکوی نشیمن ترانسفورماتور تاثیر گذار باشد. واژگونی و یا انحراف پایه ها از راستای قائم از مودهای 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 می گردد 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 تاثیر گذار 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

سطح لغزش 1017 kgf تخمین زده می شود. ضریب اصطکاک استاتیکی بین فولاد و بتن، μ ، را می توان 0.57 در نظر گرفت [۱۷]. بنابراین، نیروی عمود بر سطح N که پس از سفت کردن پیچ های دو انتهای ناودانی های کوتاه تامین می شود برابر 1784 kgf محاسبه می گردد. برای تامین این نیرو در سطح تماس هر یک از پیچ های mm ۱۲ 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 52% تنش تسلیم پیچ است. پس از سفت کردن اولیه پیچ ها (وضعیت snug-tight) این تنش با سه-چهارم دور سفت کردن مهره با رزوه 0.2 mm در پیچی بطول cm ۱۰ تامین می گردد. 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 30 cm عرض پایه در تراز نشیمن سکوی ترانس، مقاومت پیچشی اتصال 1.5 kN.m محاسبه میشود. جزییات مدل سازی اتصالات اصطکاکی پست هوایی در شکل ۵ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می شود اتصال سکو به پایه توسط دو عدد لینک غیرخطی (آیتم 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 z بوده و مقاومت تسلیم (نیروی لغزش) آنها در امتداد محور z برابر 10 kN و دوران حول محوره های x و y برابر 1.5 kN.m در نظر گرفته شده است. با توجه به وجود دو لینک در هر تکیه گاه ترانسفورماتور، مقاومت هر

زمین تکیه گاه های گیردار تعریف شده اند تا طول مدفون 1750 mm پایه را تداعی نمایند (شکل ۵).

در تحلیل های طیفی از طیف طرح استاندارد آیین نامه ۲۸۰۰ ایران [۱۶] استفاده شده است. ضمناً اثر مولفه قائم زلزله توسط طیف یکنواختی با مقدار شتاب طیفی $A_{I=0.6}$ 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 ۲۰٪ بار برف محاسبه شده است. دهانه^۵ کابل در طرفین پست ۵۰ 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 تاریخی ایرانی 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، 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 (۰.۹۲) نسبت به طیف مبنای طرح به روش مذکور در مرجع [۱۶] هم پایه شده اند. ضمناً ایستگاه های ثبت در زمین نوع III، سازگار با ساختگاه پست، قرار داشته اند.

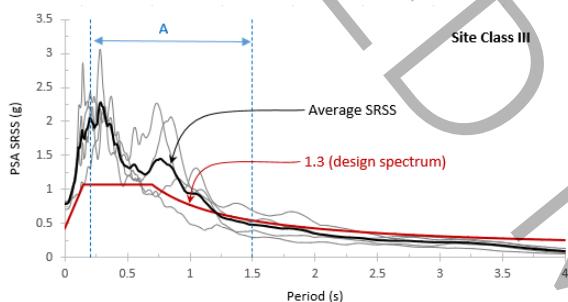
جدول ۲- مشخصات نگاشت های ثبت شده بر زمین نوع III

زلزله های مورد استفاده در تحلیل های تاریخی زمانی
Table 2 - Characteristics of the ground motions recorded on Site Class III and used in the time history analyses

Earthquake	M _w	Station	Epical 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

⁵ Span

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 ۱.۳ 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 (۰.۲ تا ۱.۵) برابر دوره تناوب اصلی سازه 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.



شکل ۶. هم پایه نمودن زلزله ها با طیف پاسخ شتاب خطی زلزله

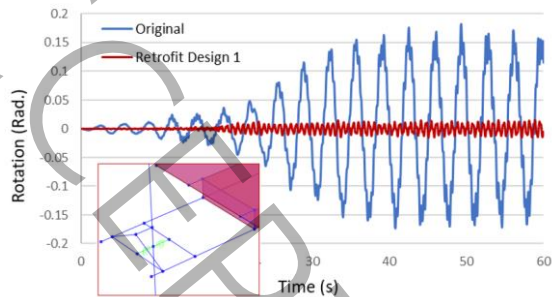
مبنای طراحی (DBE) در زمین نوع III

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

۶. ارزیابی عملکرد اتصالات اصطکاکی سکو

به منظور ارزیابی عملکرد لرزه ای سکوی ترانسفورماتور با اتصالات اصطکاکی، پاسخ تاریخیچه 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 بزرگتر 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. تاریخیچه زمانی دوران های ایجاد شده در تکیه گاه

(شکل ۵). کاهش قابل توجه دورانهای ترانسفورماتور در طرح مقاوم سازی ۱ پس از نصب دستک های مورب در شکل ۸ قابل مشاهده است.



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

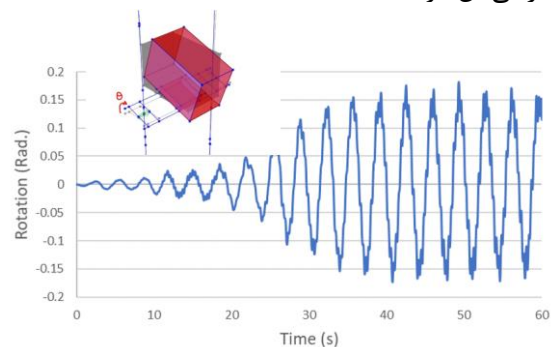
با توجه به آنکه در طرح مقاوم سازی ۱ اتصالات اصطکاکی همچنان در مسیر انتقال نیرو به پایه های بتنی قرار دارند هر گونه ضعف در مقاومت اصطکاکی می تواند موجب ناکارآمدی طرح گردد. از این رو در طرح مقاوم سازی ۲، یکی از ناودانی های زیرسری در هر طرف از وسط توسط پیچ به پایه بتنی متصل شده و عملاً بجای اصطکاک، انتقال نیرو به پایه توسط پیچ انجام می گیرد. این ساختار به جزییات 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 میشوند. وضعیت دوران های ترانسفورماتور در پست اولیه^۸ و طرح مقاوم سازی ۲ تحت اثر زلزله منجیل در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.

۷.۲. جزییات 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 توجه اقتصادی بودن طرح

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.



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

دوران های ترانسفورماتور در شکل ۷ با فرض ثابت ماندن مقاومت اصطکاکی اتصال در طول زلزله محاسبه شده اند. تجربه زلزله های گذشته موید 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

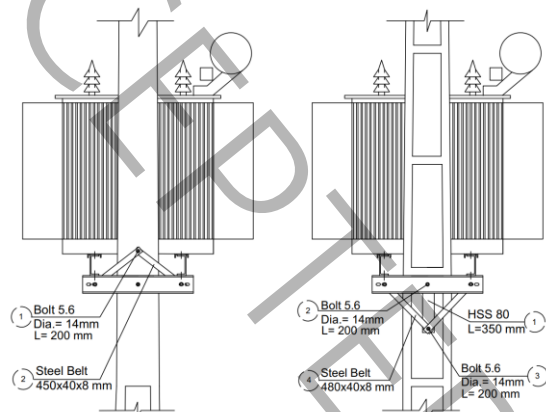
در طرح مقاوم سازی شماره ۶۱ ناودانی های زیرسری سکو توسط دو دستک مورب در هر طرف ترانسفورماتور به پایه های بتنی متصل می شوند و ساختار اتصالات اصطکاکی بدون تغییر باقی می ماند. دستک ها از تسمه های ۴۰×۸ ساخته شده اند. برای تعریف اتصال دستک های اضافه شده به پایه بتنی از یک المان صلب افقی که حد فاصل محور بدون بعد پایه و لبه خارجی پایه (محل اتصال دستک ها) را تعریف می نماید استفاده شده است

⁷ Retrofit Design 2

⁸ Original

⁶ Retrofit Design 1

است. ضخامت جان مقطع بتنی پایه حدود ۷ cm تا ۸ 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 ۱۲m به شرح زیر است.



شکل ۱۱. جزئیات مقاوم سازی اتصالات سکو به پایه های بتنی در پست هوایی مورد مطالعه
(الف) اتصال به پایه ۱۲ متری
(ب) اتصال به پایه ۹ متری

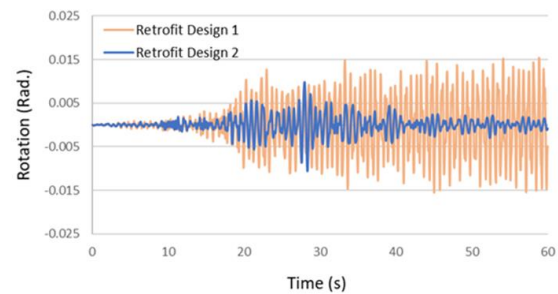
Fig. 11. Retrofit details for the platform-to-concrete-pole connection of the air post: a) connection to the 12 m pole, and b) connection to the 9 m pole

گام ۱: قوطی شماره ۸ (HSS 80) بطول لازم برش داده شده و دو عدد سوراخ هم محور به قطر ۲۰mm در دو وجه مقابل قوطی در هر یک از دوانتهای آن ایجاد می شوند. فاصله طولی سوراخها در این مطالعه موردی ۳۰cm است. قوطی شماره ۸ به عنوان یک پرکننده در فضای خالی بین جان ناودانی زیرسری سکو و جان پایه بتنی مستقر می شود (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 می گردد. 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 می نماید بسته میشود.

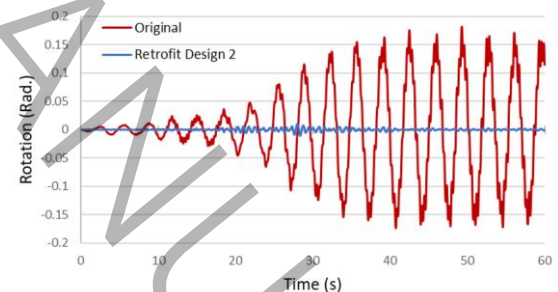
گام ۳: پس از استقرار قوطی ۸، سوراخ دوم در امتداد سوراخ موجود در قوطی در جان پایه بتنی ایجاد می شود (توجه: در پست مورد مطالعه با توجه به محل برجستگی پله پایه بتنی، دستک های مهاری از پایین وصل شده اند.

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



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



شکل ۱۰. کاهش دورانه های ترانسفورماتور در طرح مقاوم سازی ۲

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

جزئیات مقاوم سازی اتصال به پایه ۱۲m در شکل ۱۱-الف ارائه شده است. در تراز سکوی ترانسفورماتور لازم است دو عدد سوراخ به قطر ۱۶mm به فاصله حدود ۳۰cm 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

دستک های در صورت امکان می توانند از بالا ناودانی زیرسری را مهار نمایند).

گام ۴: تسمه های فلزی $40 \times 8 \text{ mm}$ در طول لازم برش داده شده و با 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 وشر و مهره از وجه پشتی پایه بسته میشود. با تنظیم سوراخ تحتانی تسمه ها، پیچ 14 mm دوم نیز به روشی مشابه با پیچ اول تعبیه شده و توسط وشر 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 9 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 $40 \times 8 \text{ mm}$ به طول مورد نیاز است.

۸. 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

میان 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 69 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.

۸.۲. معیارهای مقاومت و تغییر شکل

در کنترل کفایت اعضا در برابر زلزله، علاوه بر روش تحلیل طیفی، نتایج تحلیلهای تاریخیچه 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 نسبتاً صلب جایگزین شده اند. کار اعضای جدید در واقع تعریف بعد فیزیکی پایه بتنی در مدل است.

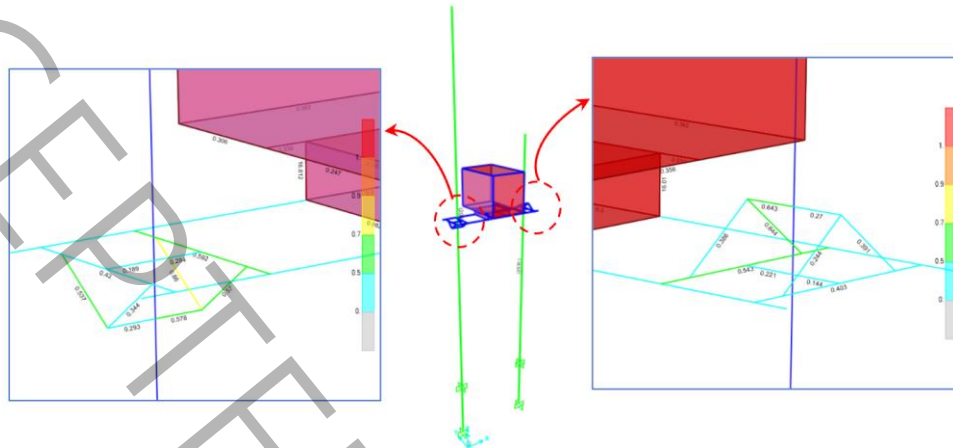
شکل ۱۲ نسبت های تقاضا به ظرفیت (DCR^9) اجزای سازه ای مختلف در اتصال تقویت شده سکو به پایه های بتنی را نشان می دهد. براساس خروجی های نرم افزار دستک های مهاری و سایر اجزای سکوی نشیمن دارای ظرفیت نیرویی لازم در تحمل تقاضای نیروهای وارده را دارا می باشند. بحرانی ترین عضو با نسبت ۰.۸۶

$DCR =$ متعلق به یکی از تسمه های فلزی $40 \times 8 \text{ mm}$ اتصال سکو به پایه 12 m متری است که از تحلیل تاریخیچه زمانی تحت اثر زلزله منجیل در ترکیب با ۱.۳ برابر بارمرده و ۰.۲ 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

⁹ Demand to Capacity Ratio

کنترل تنش های برشی و خمشی بیشینه حاصل در آنها مورد تایید قرار گرفت. همچنین، تنش های لهیدگی ایجاد شده در بتن در تماس با پیچ نمره ۱۴ نیز کنترل شدند.

(در صفحه پست) اثر نماید. در همین ترکیب بار بزرگترین مقادیر ضرایب DCR در پایه های بتنی ۱۲ m و ۹ m به ترتیب ۰,۵۹ و ۰,۶۲ محاسبه شدند. با انجام محاسبات دستی کفایت پیچ های نمره ۱۴ با



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

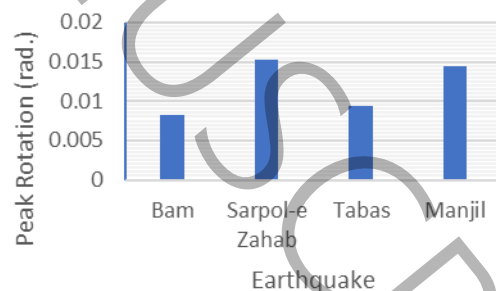
Fig. 12. The demand-to-capacity ratio of platform components after retrofitting

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

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 rad ۰,۰۱۵ است که در زلزله سرپل ذهاب رخ داده است. کوچک بودن دوران های ترانسفورماتور به معنای حفظ پایداری آن در طی زلزله می باشد.



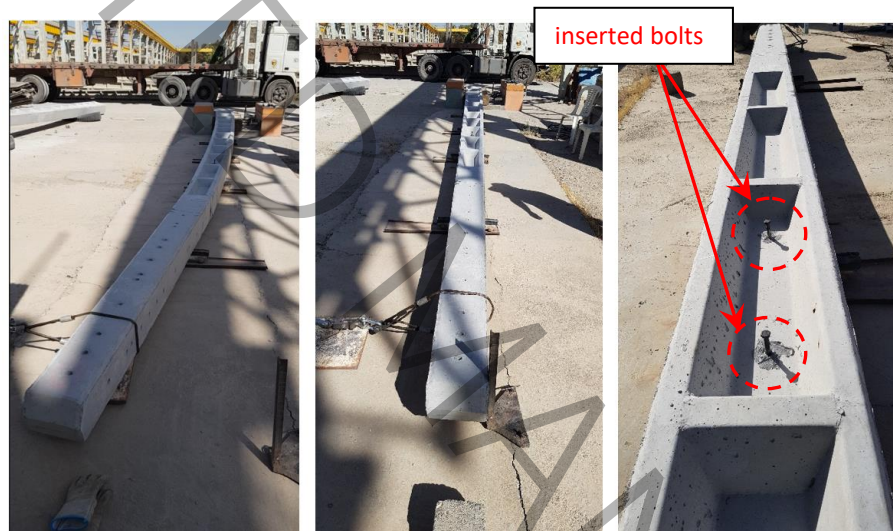
شکل ۱۳- بیشینه دوران های لرزه ای ترانسفورماتور پس از مقاوم سازی

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

نیروی گسیختگی مورد انتظار، یعنی ۱۴۰۰ 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 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.

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 ۱۷۵۰ kgf اندازه گیری شد که حدود ۴۶٪ بزرگتر از



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

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 حداثا 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 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 تری نسبت به مقاوم سازی ترانسفورماتورهای هوایی اقدام نماید.



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

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).



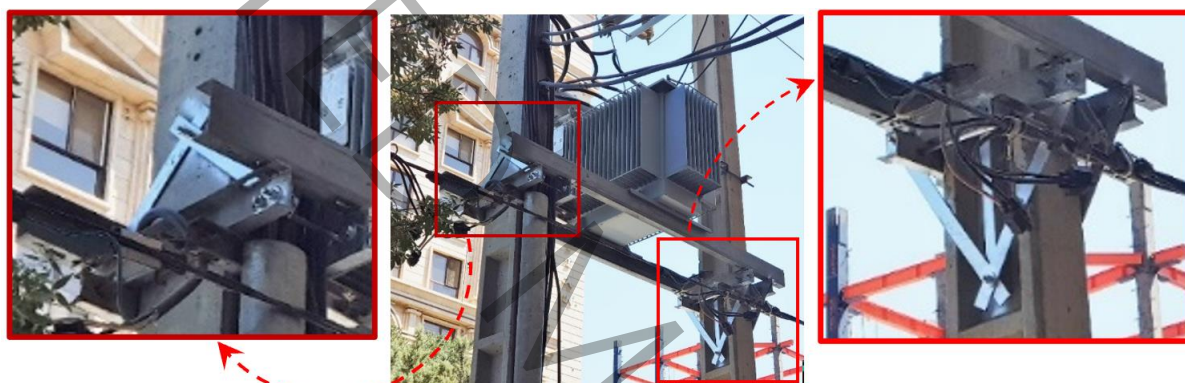
شکل ۱۶. مود گسیختگی پایه بتنی شماره ۲ (نمونه شاهد) تحت اثر نیروی کشش نهایی

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



شکل 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

پایه بلندتر پست (پایه ۱۲ m) - پیش بینی نشده است. به همین جهت، بارهای ثقیلی 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 تاریخیچه زمانی غیر خطی به اثبات رسید. جزئیات اجرایی ساده و درعین حال حرفه ای جهت مقاوم سازی اتصالات اصطکاکی سکو به پایه های بتنی ارائه و کفایت آن توسط مدلسازی کامپیوتری مورد ارزیابی و تایید قرار گرفت. جزئیات 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

جزئیات اجرایی ساده و در عین حال موثر و کاربردی نشان داده شده در شکل های فوق به جزئیات استاندارد اتصال پیچ و مهره های سکو به پایه های بتنی یعنی جزئیات 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.

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

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 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 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

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.

۱۳. منابع

- [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.
- [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*

Distribution Company, Research Deputy of Razi
University (In Persian).

ACCEPTED MANUSCRIPT