

# ارائه مدلی برای مدیریت شرایط اضطراری شبکه توزیع برق پس از وقوع زلزله در کلان شهرها با تمرکز بر پستهای فشار ضعیف

محمود حسینی، دانشیار، پژوهشگر مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله  
امیرحسین سرور، فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی، تهران  
امیر رئوفی، فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

## چکیده

مشاهده زلزله‌های گذشته نشان داده‌اند که پستهای فشار ضعیف در شبکه توزیع از آسیب‌پذیرترین مؤلفه‌های این شبکه هستند. از آنجا که تعداد این پستها در شبکه بسیار زیاد است مطالعه خطرپذیری لرزه‌ای آنها بخش مهمی از فرآیند ارزیابی و مدیریت خطرپذیری لرزه‌ای این شبکه‌ها می‌باشد. این مقاله روشی برای ارزیابی و کاهش خطرپذیری شبکه‌های توزیع با تمرکز بر مدیریت شرایط اضطراری بر اساس آسیب‌پذیری پستهای فشار ضعیف ۲۰ کیلوولت ارائه می‌نماید. روش پیشنهادی در مورد شبکه برق کلان‌شهر تهران به کار گرفته شده تا کارایی آن نشان داده شود. برای این منظور، ابتدا سناریوهای مختلف ممکن برای شهر بر اساس چشمه‌های لرزه‌زای تهدید کننده شهر در نظر گرفته شده و سپس آسیب‌پذیری ترانسفورمرهای ۲۰ کیلوولت، به عنوان مؤلفه‌های اصلی پستهای توزیع، با استفاده از منحنی‌های شکنندگی و نقشه‌های ریزپهنه‌بندی شتاب برای هر سناریو به دست آمده که نتایج به صورت نقشه‌های آسیب‌پذیری ارائه شده است. با استفاده از این نقشه‌ها و با در دست داشتن تعداد مشترکین در هر یک از نواحی شهر می‌توان تعداد مشترکینی که در هر سناریو دچار خاموشی می‌شوند را مشخص نمود و بر این اساس مسئولین می‌توانند در خصوص اقدامات مدیریتی لازم برای کنترل شرایط اضطراری تصمیم‌گیری نمایند.

**کلیدواژه‌ها:** آسیب‌پذیری لرزه‌ای، مدیریت خطرپذیری، شبکه توزیع نیروی برق، پستهای فشار ضعیف، منحنی شکنندگی

## ۱- مقدمه و مروری بر مطالعات گذشته

از آنجا که عدم برق‌رسانی پس از وقوع زلزله می‌تواند باعث خسارات ثانویه زیادی شود، و شبکه توزیع برق و مؤلفه‌های گوناگون آن از جمله پستها نقش مهمی برای برقراری جریان برق جهت شرایط اضطراری کلان‌شهرها دارند، ارائه یک مدل برای مدیریت خطرپذیری پستها می‌تواند مسئولین را بیشتر از آسیبهای احتمالی آگاه سازد و آنان را کمک نماید تا تصمیمات مؤثرتری برای مدیریت خطرپذیری لرزه‌ای، از جمله کنترل مناسبتر شرایط اضطراری، اخذ نمایند. پستها در شبکه برق نقاطی گرهی هستند که ارتباط بین خطوط مختلف برق کشور را به طرق مختلف برقرار می‌نمایند. یکی از انواع پستها، پست توزیع می‌باشد. این نوع پست از نظر تعداد در سطح شهرها قابل توجه است و آخرین حلقه از زنجیره انتقال برق از نیروگاه به نقاط مصرف می‌باشد. تعداد زیاد پستها خود نشان‌دهنده اهمیت آنها در عملکرد سامانه برق شهری می‌باشد. پژوهشگران متعددی از اوایل دهه ۸۰ میلادی در رابطه با ارزیابی و کاهش خطرپذیری لرزه‌ای سامانه‌های برق تلاش کرده‌اند [۱-۲] و این گونه مطالعات تا سالهای اخیر نیز ادامه یافته است [۳]. با این حال در میان مطالعات انجام شده تنها اندکی به مواردی که دربرگیرنده ارزیابی لرزه‌ای پستها باشد، پرداخته‌اند [۴-۶]. اخیراً با همکاری مؤلف اول این مقاله مطالعه‌ای در مورد عملکرد لرزه‌ای تجهیزات پستهای برق در زلزله‌های اخیر ایران صورت گرفته است [۷] که بر اساس آن روشی برای ارزیابی خطرپذیری لرزه‌ای پستهای فشار قوی نیز ارائه شده است [۸]. ملاحظه می‌گردد که علی‌رغم تعداد بسیار زیاد پستهای فشار ضعیف

۲۷ نیروگاه برق آبی تولید می‌گردد. وظایف توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر توسط سازمان انرژی‌های نو (سانا) با استفاده از پیمانکاران داخلی و خارجی تحقق می‌پذیرد. در ادامه به اختصار هر یک از سه بخش تولید، انتقال و توزیع بررسی می‌گردد.

## ۲-۱- بخش تولید

اولین، اصلی‌ترین و مهمترین بخش صنعت برق، بخش تولید نیرو می‌باشد. نظر به هزینه‌بر بودن زیاد واحدهای تولیدی از یک سو و نقشی که این واحدها در تأمین برق به عهده دارند. از سوی دیگر، می‌باید همواره احداث نیروگاه‌های جدید و سرویس و نگهداری از واحدهای قدیمی با دقت و وسواس کافی و برنامه‌ریزی هر چه صحیحتر و روزآمدتر صورت گیرد. در سال ۱۳۸۴، ۲۴ واحد نیروگاهی جدید با قدرت نامی ۳۷۰۴ مگاوات در کشور نصب شد. به این ترتیب جمع قدرت نامی مصوبه نیروگاهها در سال مزبور به ۴۱۰۰۳ مگاوات بالغ گردید که نسبت به سال قبل ۹/۹٪ افزایش داشت. در بخش تولید، شبکه برق ایران از چند نوع نیروگاه اعم از بخاری، گازی، سیکل ترکیبی، برق آبی و بادی استفاده شده‌است.

## ۲-۲- بخش انتقال و فوق توزیع

محل احداث نیروگاه‌های بزرگ برق کشور با توجه به عوامل مختلف فنی، اقتصادی و اجتماعی تعیین می‌گردد. از جمله این عوامل وجود منابع سوخت، آب و همچنین بُعد مسافت با مناطق مسکونی (به لحاظ جلوگیری از آلودگیهای زیست محیطی و ...) می‌باشد و از آنجا که غالباً تجمع این عوامل در مجاورت مراکز مصرف برق امکانپذیر نیست، لذا خطوط انتقال به عنوان رساننده نیرو از مراکز تولید به مراکز مصرف عمل می‌کنند. در اثر فاصله زیاد بین محل تولید و محل مصرف مقداری از انرژی الکتریکی در هادیهای انتقال به صورت حرارت تلف می‌شود. برای کم کردن این تلفات، ولتاژ برق تا حد امکان به کمک مبدلهایی در محل ایستگاههایی موسوم به پست افزایش می‌یابد. پستها با افزایش ولتاژ برق در محل تولید و کاهش آن در نزدیک

و آسیب‌پذیری بالای آنها در برابر زلزله، این پستها هنوز مورد مطالعه کافی قرار نگرفته‌اند. موضوع مطالعه در این تحقیق، ارائه مدلی برای مدیریت شرایط اضطراری شبکه توزیع برق پس از وقوع زلزله در کلان‌شهرها با تمرکز بر پستهای فشار ضعیف و بکارگیری مدل در کلان‌شهر تهران می‌باشد. برای این منظور، ابتدا یکی از تجهیزات مهم پست توزیع که یک ترانس تبدیل ۲۰ کیلوولت به ۴۰۰ ولت است، از لحاظ رفتار لرزه‌ای مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و سپس منحنی شکنندگی این ترانس بر اساس بیشینه شتابهای متفاوت به دست آمده است. بر اساس منحنی شکنندگی به دست آمده بیشینه شتابی احتمالی که باعث از کار افتادن این نوع ترانس می‌شود، مشخص گردیده است. از طرف دیگر بر اساس تحلیل خطر انجام شده برای شهر تهران، بیشینه شتابهای محتمل مناطق مختلف برای دو سناریوی اصلی زلزله موجود می‌باشد. با استفاده از منحنی شکنندگی و بیشینه شتابهای نقاط مختلف شهر، احتمال قطع برق در مناطق مختلف شهر در اثر هر یک از زلزله‌های سناریو پیش‌بینی و مشخص شده که چه تعداد از مشترکان تحت هر یک از زلزله‌ها دچار قطعی برق خواهند شد. این اطلاعات می‌تواند به مسؤولین امر کمک نماید تا تصمیمات مناسبتری در راستای مدیریت خطرپذیری اخذ نمایند.

## ۲-۳- نگاهی به تأسیسات شبکه برق کشور

وظیفه راهبری و پایش شبکه تولید و انتقال برق کشور، اداره و توسعه بازار برق، خرید و فروش عمده برق در داخل و خارج کشور، فراهم نمودن امکان دسترسی به شبکه برق کشور برای متقاضیان دولتی و غیردولتی به منظور خرید و فروش و ترانزیت برق را، شرکت مدیریت شبکه برق ایران عهده‌دار می‌باشد. تأمین، تولید، انتقال، توزیع و فروش نیروی برق توسط ۱۶ شرکت برق منطقه‌ای در سطح کشور صورت می‌گیرد. ۹۸ درصد از سهم تولید برق سالیانه کشور توسط واحدهای تحت پوشش وزارت نیرو و مابقی، سهم نیروگاه‌های اختصاصی است. از سهم تولید وزارت نیرو ۹۳ درصد توسط ۵۸ نیروگاه حرارتی و مابقی توسط

به ناپایداریهای کلی و جزئی شبکه و در نتیجه خسارات زیادی به آن می‌انجامد. با توجه به تنوع و تعدد پارامترهای مؤثر بر پایداری شبکه، راهبری و هدایت اجزای شبکه جهت جلوگیری از بروز اختلال در شبکه نیازمند سیستمی جهت اخذ اطلاعات از شبکه، کنترل و فرمان دادن به اجزای مختلف آن جهت ورود، خروج و تغییر شاخصهای الکتریکی می‌باشد. این وظیفه به عهده کنترل و مدیریت شبکه (دیسپاچینگ) می‌باشد.

### ۳- پست توزیع شهری و قسمتهای مختلف آن

برق تولیدی نیروگاهها در بدو ورود به شهرها وارد پستهای فوق توزیع مشتمل بر ۴۰۰ کیلوولت و ۲۳۰ کیلوولت شده و از آن جا به پستهای ۶۳ کیلوولت که تعدادشان نسبتاً زیاد است، انتقال داده می‌شود و سپس پستهای ۶۳ کیلوولت در هر منطقه، برق را به پستهای ۲۰ کیلوولت انتقال و از آنجا به سمت نقاط مصرف یا مشترکان خانگی می‌رسانند. در هر مرحله، پستها یک تبدیل ولتاژ انجام می‌دهند.

پستهای توزیع شهری که تبدیل ولتاژ ۲۰۰۰۰ به ۴۰۰ ولت را انجام می‌دهند، دارای یک ساختمان دو طبقه به ابعاد حدودی  $6 \times 8$  متر در پلان می‌باشند. ارتفاع طبقه زیرین ۱ متر و ارتفاع طبقه بالا ۴ متر است. عملکرد پست به این صورت است که کابلهای ۲۰۰۰۰ ولت ورودی از پست فوق توزیع وارد سلولهای فشار قوی این پست می‌شود که با دو کلید دژنکتور و سکسیونر قابل قطع می‌باشد و خروجی این سلولها وارد اولیه ترانس قدرت ۲۰۰۰۰ ولت به ۴۰۰ ولت می‌شود و از ثانویه ترانس ولتاژ ۴۰۰ ولت وارد سلولهای فشار ضعیف می‌شود و بعد از خروجی کلید فشار ضعیف وارد فیدرهای فشار ضعیف می‌شود و از طرف دیگر به سوی مشترکین خانگی و سایر مصارف می‌رود. همان طور که گفته شد پست از دو طبقه تشکیل شده، طبقه زیرزمین مخصوص کابلهای فشار ضعیف و فشار قوی پست است و طبقه بالا مخصوص تأسیسات پست می‌باشد. شکل (۱) دیاگرام کلی از یک پست توزیع زمینی را نشان می‌دهد.

محل مصرف نقش مهم و کلیدی در انتقال انرژی برق ایفاء می‌کنند. پستهای برق به سه نوع عمده تقسیم می‌شوند که عبارتند از: پست انتقال، پست فوق توزیع و پست توزیع. تجهیزات نصب شده در پستهای انتقال و توزیع بر حسب قدرت و ظرفیت انتقال نیز تفاوت دارند و به ترتیب به ۲۳۰، ۱۱۰، ۶۳ و ۲۰ کیلوولت تقسیم می‌شوند و مرکب از انواع کلیدها که آنها را سکسیونر و دژنکتور می‌نامند، راکتورها، خازنها و مبدلها (ترانسفورماتورها) هستند. پست بدون مبدل "کلیدخانه" یا "پست کلیدزنی" خوانده می‌شود. برق دریافتی از نیروگاه در پستهای انتقال و توزیع به وسیله مبدلهای کاهنده در حد میزان ولتاژ مورد نیاز کاهش می‌یابد و به نقطه یا مصرف‌کننده مورد نظر ارسال و توزیع می‌شود.

### ۲-۳- بخش توزیع

بخش توزیع نیرو رابط بین صنعت برق و مشترکان است و نقشی چند سویه بر عهده دارد. نخست خدمات‌رسانی به مشترکان و تأمین رضایت ایشان و فروش انرژی برق به عنوان یک کالای اقتصادی، دوم نقش فنی برای نگهداری، راهبری و توسعه شبکه‌های توزیع و سوم حفظ ارتباط و هماهنگی با بخشهای بالادست صنعت برق به طوری که موجبات ادامه فرآیند تولید و عرضه برق حاصل گردد و راه توسعه این صنعت هموار شود. بدیهی است هدایت و راهبری این حجم فعالیت در گستره کشور، سیاست‌گذاری منسجم و هماهنگی را طلب می‌نماید و صرفاً با نگرش یکپارچه و متوازن به بخشهای تولید، انتقال و توزیع حصول آرمانه‌های صنعت برق ممکن خواهد بود.

### ۲-۴- بخش کنترل و مدیریت شبکه (دیسپاچینگ)

شبکه انتقال و توزیع برق شبکه‌ای بسیار پیچیده و پویا است که مشخصات الکتریکی در آن در هر منطقه بسته به میزان و نحوه مصرف انرژی برق در حال تغییر است. بروز بحرانهایی نظیر افزایش مصرف یا از کار افتادن و خروج قسمتی از مدار از شبکه و یا ورود یک قسمت از مدار به شبکه ممکن است باعث بروز اختلال در شبکه گردد که گاه

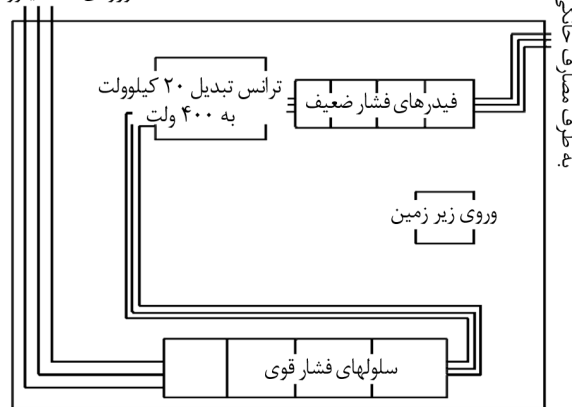
## ۵- نحوه مدلسازی

همان طور که در تصویر (۱) نشان داده شده است، ترانس مورد نظر، یک جسم صلب به ابعاد  $1/75 \times 0/98 \times 1/75$  متر و دارای وزن تقریبی ۱۵۰۰ کیلوگرم می‌باشد. تکیه‌گاههای این ترانس چهار چرخ هستند که دو به دو روی یک ریل قرار می‌گیرند و تنها قادر به حرکت در راستای طول ترانس می‌باشند. شعاع چرخها ۵۰ میلیمتر و طول درگیر در مقاومت غلتشی فلز بر روی فلز برابر با  $0/5$  میلیمتر می‌باشد. ترانس مذکور به دلیل وزن زیاد و خال جوشهایی که دو چرخ جلویی را به ریل وصل می‌کند در شرایط بهره‌برداری ساکن می‌باشد و پس از بریده شدن خال جوشها در اثر تکان شدید ناشی از زلزله، می‌توان آن را از لحاظ دینامیکی به عنوان یک جسم صلب یکدرجه آزاد در نظر گرفت. در اثر زلزله، دو نیروی مقاوم در برابر حرکت ترانس وجود دارند که عبارتند از خال جوشها و سپس مقاومت غلتشی. برای مدلسازی حرکت ترانس و محاسبه تغییرمکان در اثر شتابنگاشتهای مختلف از برنامه نوشته شده در محیط *MATLAB* استفاده و اثر این دو نیروی مقاوم در برنامه در نظر گرفته شده است. ابتدا به معرفی معادله حرکت جسم یکدرجه آزاد شبیه‌سازی شده و سپس به معرفی روش عددی به کار گرفته شده جهت حل این معادله می‌پردازیم.



تصویر (۱): نمایی از نوع متداول ترانس موجود در پستهای توزیع.

ورودی ۲۰ کیلوولت



شکل (۱): طرح شماتیک یک پست توزیع زمینی.

## ۴- ارزیابی تحلیلی آسیب‌پذیری پست توزیع با در نظر گرفتن منحنی شکنندگی

همان طور که در بخش پیشین بیان شد، پست توزیع زمینی از یک مجموعه فیدرهای فشار ضعیف و فشار قوی و همچنین یک ترانس تبدیل ۲۰ کیلوولت به ۴۰۰ ولت تشکیل شده است. تجربه زلزله‌های گذشته نشان داده است که در این پستها تجهیزاتی که عمدتاً خرابی آن به قطع عملکرد پست می‌انجامد ترانس است. به همین دلیل برای بررسی آسیب‌پذیری پست، در این پژوهش آسیب‌پذیری ترانس مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا یک مدل متداول از ترانس داخل پست توزیع با در نظر گرفتن تکیه‌گاه و سایر مشخصات آن مورد تحلیل قرار گرفته، سپس به بررسی اثر زلزله‌های مختلف بر ترانس پرداخته و در نهایت منحنی شکنندگی در مود لغزشی رسم شده است. برای مدل کردن رفتار دینامیکی ترانس در حین زلزله و حل معادله دیفرانسیل مربوط به آن از برنامه‌ای که در محیط *MATLAB* نوشته شده، استفاده گردیده است. این برنامه، بیشینه تغییرمکان ناشی از تحلیل تاریخچه زمانی را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. در این تحلیل‌ها از هفت شتابنگاشت مربوط به زلزله‌های مختلف استفاده و به منظور رسم منحنی شکنندگی تمامی زلزله‌ها را به هفتاد و یک سطح *PGA* (از  $0/1g$  تا  $0/8g$  با فواصل  $0/1g$ ) مقیاس نموده تا بتوان منحنی دقیقتری رسم نمود.

$$F_{rolling} = \frac{W \times b}{r} = \frac{15000 \times 0.5}{50} = 150N$$

بر اساس بررسیهای انجام شده مقاومت خال جوش موجود در زیر هر چرخ در حدود یک کیلونیوتن می‌باشد، که با توجه به وجود دو چرخ دارای اتصال خال جوش این نیروی مقاوم برابر با ۲۰۰۰ نیوتن می‌باشد. در نتیجه با توجه به جرم ترانس مقدار شتاب لازم زمین جهت جداکردن چرخها از زمین و شروع حرکت ترانس از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_W = 2000 \rightarrow a_{req} = \frac{2000}{1500} = 1.33m/sec^2$$

ترانس مورد نظر تحت هفت شتابنگاشت که مشخصات آنها در جدول (۱) و نمودارهای آنها در شکل (۳) ارائه شده، تحلیل گردیده است. در مورد هر شتابنگاشت، شتاب حداکثر ( $PGA$ ) آن با مقادیر  $0.1g$  تا  $0.8g$  با فواصل  $0.1g$  مقیاس شده‌اند. به عبارتی دیگر برای هر شتابنگاشت  $71$  مقدار  $PGA$  مورد استفاده قرار گرفته که با توجه به در نظر گرفتن هفت شتابنگاشت، جمعاً  $479$  مورد تحلیل صورت گرفته است.

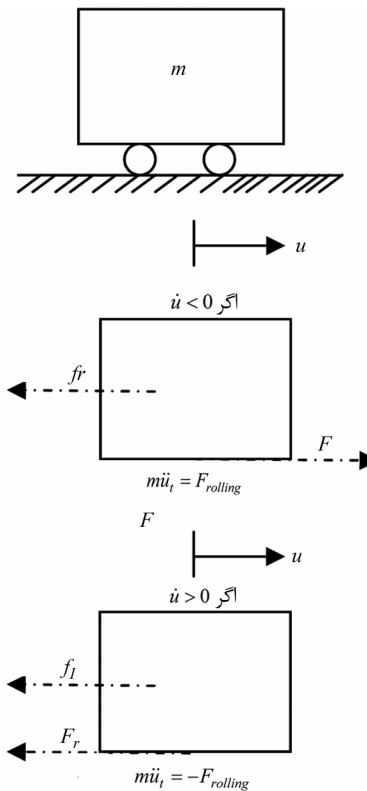
جدول (۱): زلزله‌های استفاده شده جهت تحلیل ترانس جهت به دست آوردن منحنی‌های شکنندگی.

شماره	نام زلزله	شتاب حداکثر ( $g$ )
۱	السنتر و ۱۹۵۰/۵/۱۸	۰/۳۱۹
۲	طیس ۱۹۷۸/۹/۱۶	۰/۸۳۶
۳	گازلی ۱۹۹۶/۵/۱۷	۰/۶۷
۴	چی-چی ۱۹۹۹/۰۹/۲۰	۰/۸۲
۵	لاندرز ۱۹۹۲/۶/۲۸	۰/۷۸
۶	کامپندوسینو ۱۹۹۲/۴/۲۵	۰/۳۸۵
۷	نورث ریچ ۱۹۹۵/۰۱/۱۷	۰/۷۸

در اشکال (۴) تا (۶)، پاسخهای جابه‌جایی-زمان و نیرو-جابه‌جایی ترانس برای سه نمونه از زلزله‌هایی که نمودار شتاب زمان آنها ارائه گردیده، نشان داده شده است. شایان ذکر است که مقدار نیرو در نمودارهای نیرو-جابه‌جایی در تمامی موارد بین دو مقدار مثبت و منفی  $150$  نیوتن می‌باشد که این کمیّت همان مقاومت غلتشی چرخهای ترانس روی ریلهای مربوطه است.

## ۶- تشکیل و حل معادلات حرکت دینامیکی سیستم

دیگرام آزاد نیروهای درگیر در تعادل دینامیکی سیستم و معادله حرکت مربوطه در شکل (۲) نشان داده شده است.

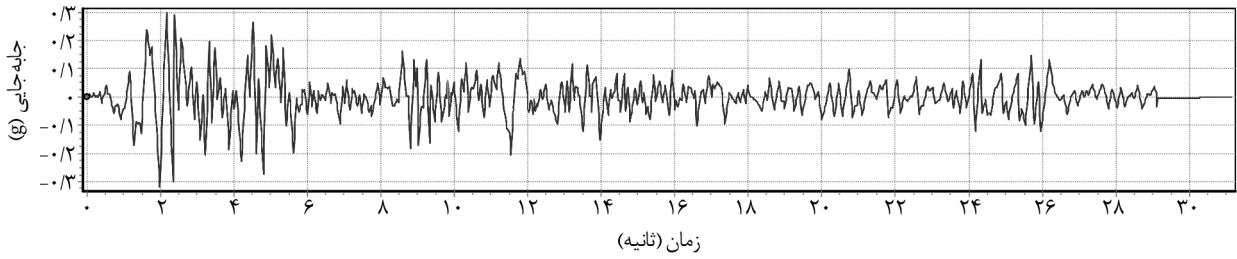


شکل (۲): تعادل دینامیکی ترانس و روابط مربوطه.

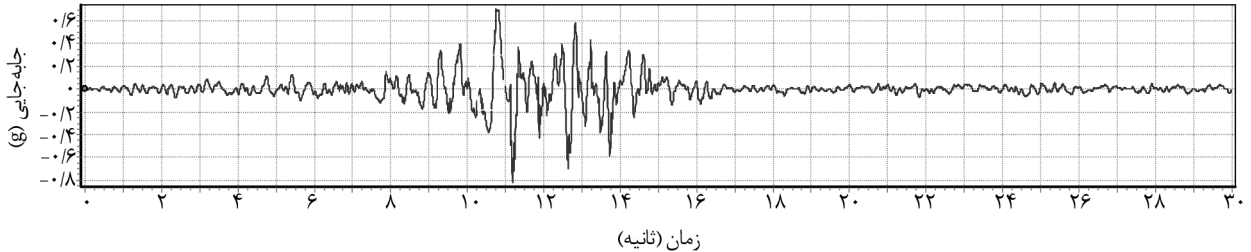
با توجه به شکل (۲) و از آنجا که شتاب کل برابر با مجموع شتاب نسبی و شتاب مطلق زمین ( $\ddot{u}_t = \ddot{u}_g + \ddot{u}_{re}$ ) می‌باشد، معادله حرکت سیستم چنین خواهد بود:

$$\ddot{u}_t = \text{sign}(\dot{u})F_{rolling} - \ddot{u}_g$$

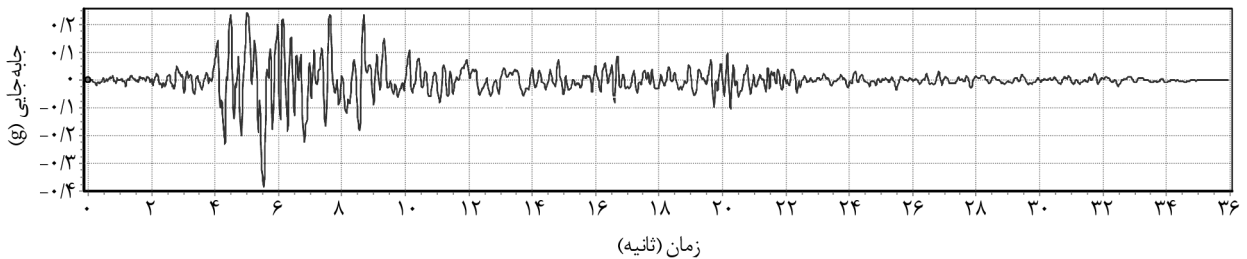
جهت حل معادله دیفرانسیل تشکیل شده، به صورت عددی از روش رونگه-کوتا استفاده شده است [۹]. برنامه نوشته شده در محیط نرم‌افزار  $MATLAB$  با گرفتن شتابنگاشت مورد نظر تاریخچه پاسخ ترانس را محاسبه می‌کند. در محاسبه پاسخ دینامیکی برنامه به نحوی تنظیم شده که تا زمانی که مقدار شتاب ورودی از شتاب لازم برای کنده شدن خال جوش کمتر باشد، مقدار تغییر مکان نسبی را صفر در نظر می‌گیرد. مقدار مقاومت غلتشی سیستم جهت تحلیل ترانس به این صورت محاسبه شده است.



شتاب مربوط به زلزله سنترو

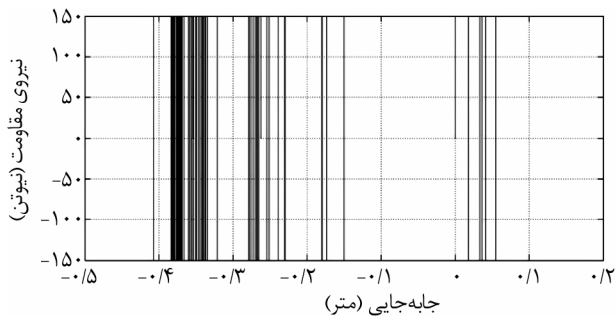


شتاب مربوط به زلزله چی-چی

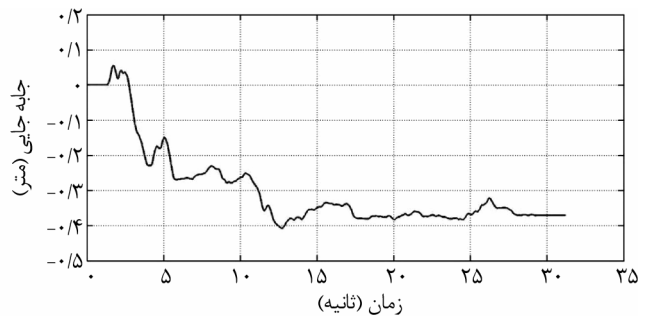


شتاب مربوط به زلزله کاپمندوسینو

شکل (۳): نمودارهای شتاب زمان سه نمونه زلزله استفاده شده جهت تحلیل ترانس.

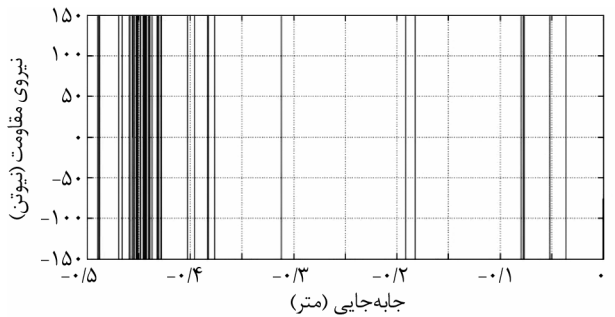


ب) نمودار نیرو-جابه جایی

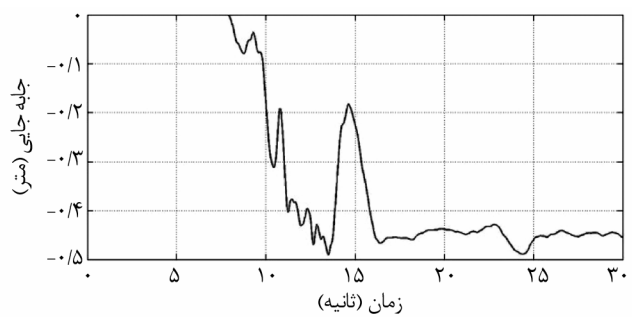


الف) نمودار جابه جایی-زمان

شکل (۴): نمودارهای پاسخ مربوط به زلزله سنترو.

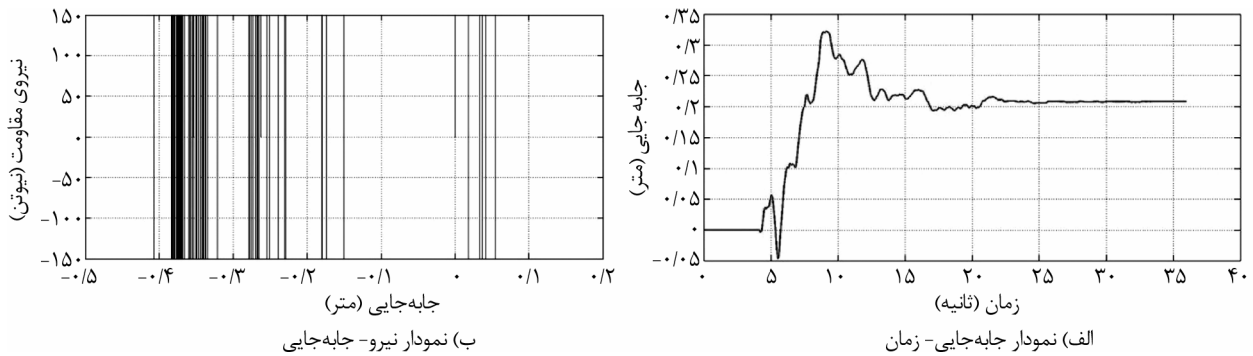


ب) نمودار نیرو-جابه جایی



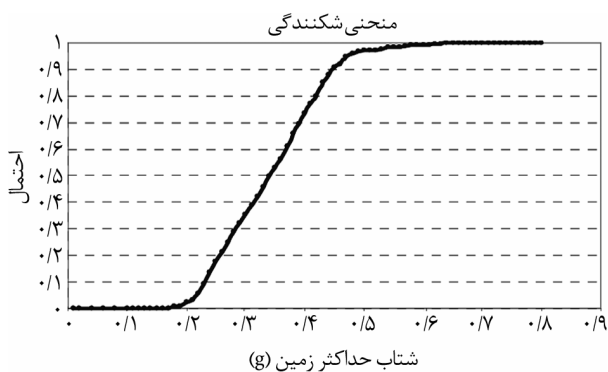
الف) نمودار جابه جایی-زمان

شکل (۵): نمودارهای پاسخ مربوط به زلزله چی-چی



شکل (۶): نمودارهای پاسخ مربوط به زلزله کاپمندوسینو.

فرض می‌شود. در رابطه (۳)،  $EDP$  پارامتر تقاضای مهندسی است که از خروجی تحلیل‌های تاریخچه زمانی به دست می‌آید و  $AC$  شرایط قابل قبول مربوط به حالت حدی مفروض و در واقع حد شکست می‌باشد. تجربه زلزله‌های گذشته و همچنین برآوردهای مهندسان قدرت نشان داده است که چنانچه حرکت نسبی ترانس به حدود ۳۰ سانتیمتر برسد، می‌تواند منجر به خروج آن از ریل، و در نتیجه کنده شدن بوشینگها و قطع برق شود. بنابراین حرکت نسبی ۳۰ سانتیمتر به عنوان حد شکست در نظر گرفته شده است که جایگزین مقدار  $x_1$  در روابط (۲) و (۳) می‌گردد. بر این اساس منحنی شکنندگی ترانس مطابق با شکل (۷) به دست آمده است.



شکل (۷): منحنی شکنندگی به دست آمده برای ترانس مورد مطالعه.

### ۸- برآورد آسیب‌پذیری پستها در سطح شهر تهران برای کمک به مدیریت شرایط اضطراری

در این بخش، با در نظر گرفتن دو سناریوی گسل ری و گسل شمال تهران تأثیر هر یک از آنها بر پستهای زمینی برق

همان گونه که در اشکال (۴) تا (۶) ملاحظه می‌گردد، در هر مورد تا چند ثانیه ترانس نسبت به زمین حرکت نکرده است و پس از فائق آمدن نیروی ناشی از زلزله بر مقاومت خال جوشها حرکت نسبی آغاز شده است. نیروی جانبی نیز در همه موارد به مقدار مقاومت غلتشی محدود بوده است.

### ۷- تولید منحنی شکنندگی

برای تولید منحنی‌های شکنندگی بر اساس نتایج تحلیل‌های تاریخچه زمانی و روش احتمالاتی، مقدار  $PGA$  به عنوان شاخص خطر و مقدار تغییرمکان ترانس نسبت به ریل به عنوان شاخص آسیب مورد استفاده قرار گرفته است که در صورت فراتر رفتن از مقداری خاص منجر به خروج چرخها از ریل و از کار افتادن ترانس می‌شود. با توجه به این که از هفت شتابنگاشت استفاده شده، به ازای هر  $PGA$  تعداد هفت خروجی برای جابه‌جایی بیشینه در اختیار بوده است. با استفاده از این مقادیر بیشینه، ابتدا منحنی تابع چگالی توزیع نرمال داده‌ها طبق رابطه (۱) و سپس منحنی تابع چگالی توزیع تجمعی نرمال آنها طبق رابطه (۲) و در نهایت منحنی شکنندگی با استفاده از رابطه (۳) به دست آمده است:

$$f_x = \frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (1)$$

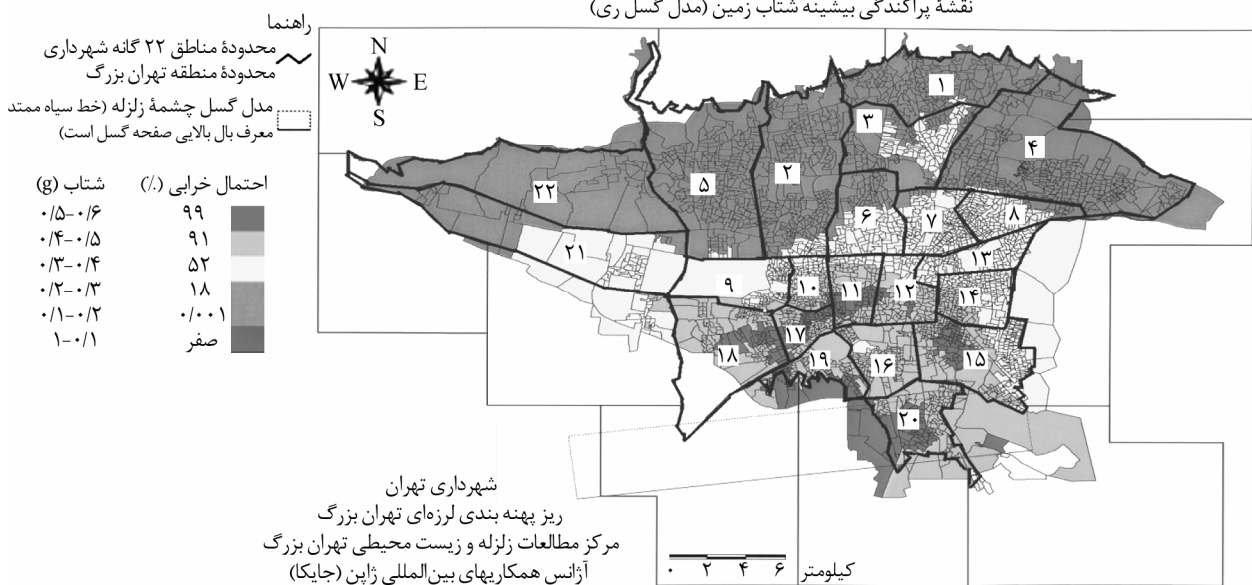
$$F_x = \int_0^{x_1} f_x dx = \Phi\left(\frac{x_1 - \mu}{\sigma}\right) \quad (2)$$

$$P[EDP > AC | IM] = 1 - P[EDP > AC | IM] = 1 - \Phi\left(\frac{x_1 - \mu}{\sigma}\right) \quad (3)$$

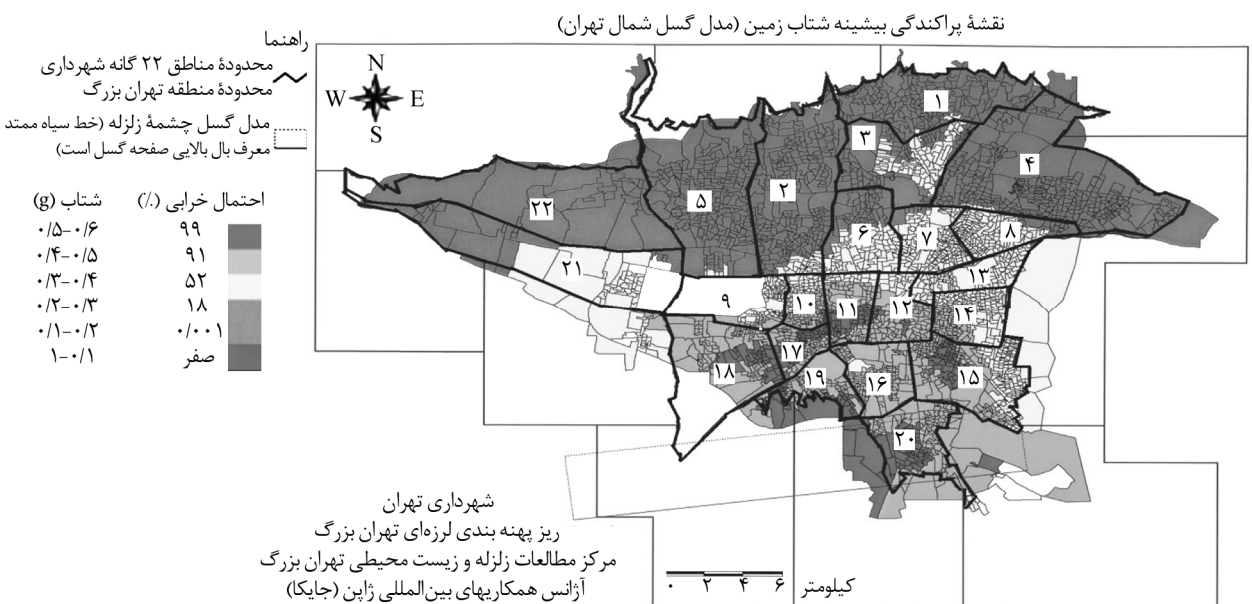
در این روابط  $\mu$  میانگین،  $\sigma$  انحراف معیار و  $IM$  شدت زلزله است که معمولاً برابر شتاب حداکثر زمین ( $PGA$ )

خرابی بالای ۵۰ درصد باشد، عملکرد پست مختل شده و در نتیجه برق مشترکین منشعب از پست قطع می‌شود. با توجه به در اختیار داشتن آمار مربوط به مشترکان و تعداد پستهای زمینی در هر منطقه می‌توان تعداد مشترکانی که برق آنها در اثر زلزله محتمل قطع می‌شود را تخمین زد و در نهایت مشخص می‌شود که در کدام مناطق تهران آسیب پستها در اثر زلزله بیشتر و در کدام مناطق کمتر است. جدول (۲)، مشخصات کلی شبکه برق تهران به تفکیک مناطق شرکت برق منطقه‌ای تهران را معرفی می‌نماید.

مورد ارزیابی واقع شده است. در مطالعات انجام شده توسط آژانس همکاریهای بین‌المللی ژاپن (JICA)، بیشینه شتاب نقاط مختلف شهر تهران با در نظر گرفتن دو سناریوی گسلی و گسل شمال تهران موجود می‌باشد، اشکال (۸) و (۹). در شکل (۱۰)، با توجه به مشخص بودن تعداد و موقعیت پستها در هر منطقه و همچنین  $PGA$  حاصل از نتایج JICA می‌توان قطع برق مناطق مختلف شهر در اثر از کار افتادن سیستم پست توزیع زمینی را در اثر زلزله با  $PGA$  مشخص تخمین زد. در اینجا فرض شده است در صورتی که احتمال

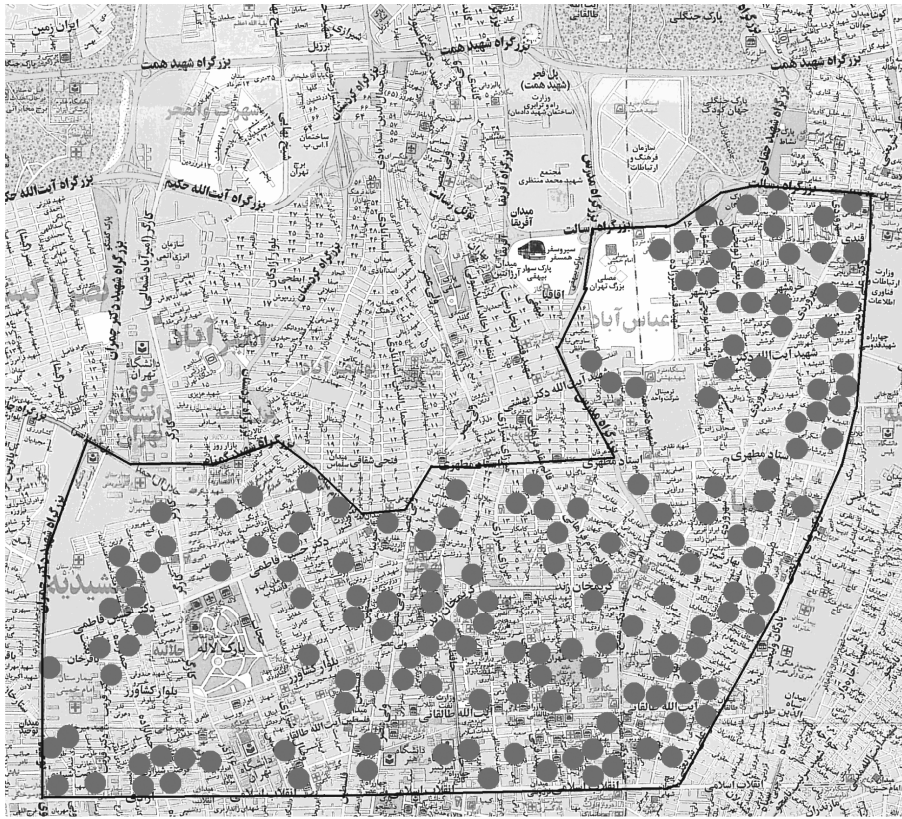


شکل (۸): نقشه پراکندگی بیشینه شتاب زمین (مدل گسل ری).



شکل (۹): نقشه پراکندگی بیشینه شتاب زمین (مدل گسل شمال تهران).





شکل (۱۰): نمایی از موقعیت پستهای توزیع منطقه بوعلی از زیر مجموعه‌های شرکت برق منطقه‌ای تهران.

جدول (۲): معرفی مشخصات کلی شبکه برق تهران به تفکیک مناطق شرکت برق منطقه‌ای.

منطقه	زیر منطقه	تعداد مشترکان	تعداد مراکز هوایی ۲۰ کیلوولت	تعداد مراکز زمینی ۲۰ کیلوولت	کابل هوایی ۲۰ کیلوولت (کیلومتر)	کابل هوایی ولتاژ پایین (کیلومتر)	کابل زمینی ولتاژ پایین (کیلومتر)	سطح هر منطقه (کیلومتر مربع)
شمال غربی	دانشگاه	۱۳۷۵۹۴	۷۳	۴۰۶	۴۲۰۹۵	۱۳۴۰۵۴	۲۰۰۵۲۲	۳۵۴۵۰
	یوسف‌آباد	۱۵۹۳۳۳	۱۹۶	۵۴۳	۷۹۹۷۹	۲۱۹۴۰۱	۳۶۹۹۱	۶۷۸۳۰
	قدس	۱۵۴۹۸۱	۵۷۹	۷۵۰	۲۴۹۰۶۴	۲۰۳۵۸۲	۲۴۷۴۴۷	۲۹۴۹۷
شمال شرقی	شمیران	۱۱۹۱۵۵	۶۱	۴۴۵	۳۰۰۰۰	۱۸۷۰۰۰	۳۶۴۰۰	۵۵۰۰۰
	نارمک	۱۲۸۶۲۶	۱۲	۲۵۶	۱۳۰۰۰	۲۰۰۰۰	۳۶۰۰۰۰	۱۶۲۰۰
	پاسداران	۱۳۳۸۱۲	۲۴	۳۷۷	۱۸۰۰۰	۱۹۶۰۰۰	۴۲۰۰۰	۳۵۵۰۰
جنوب غربی	تهرانپارس	۷۳۸۱۸	۱۰۰	۲۵۳	۱۱۱۰۰۰	۹۱۰۰۰	۲۷۲۰۰۰	۵۰۰۰۰
	سینا	۷۱۷۰۰	۳۷۲	۲۹۲	۲۲۹۱۵۱	۸۱۷۸۶	۲۴۹۰۷۳	۳۳۵۰۰
	جوادیه	۱۰۳۰۰۰	۳۲۳	۲۸۳	۲۲۳۲۰۰	۱۵۹۲۲۰	۴۱۴۹۵۱	۱۲۰۰۰
جنوب شرقی	رودکی	۱۰۵۴۳۲	۷۹	۲۷۴	۱۹۷۴۸	۱۸۷۴۳	۲۱۵۲۰۰	۲۰۰۰۰
	افسریه	۹۵۴۳۶	۱۲۴	۱۹۱	۷۳۴۴۰	۶۳۰۶۸	۶۱۶۵۳۷	۵۴۰۰۰
	شهر ری	۱۰۹۴۶۰	۱۰۶	۳۵۳	۳۴۶۷۴۰	۵۱۶۲۷	۲۹۱۷۱۵	۵۴۰۰۰
مرکزی	هفت تیر	۱۲۳۴۸۵	۱۳۱	۳۴۲	۶۵۰۰۰	۶۹۰۰۰	۴۰۸۰۰۰	۱۴۰۰۰
	۱۷ شهریور	۱۵۶۹۳۴	۲۸	۲۷۴	۱۵۰۰۰	۱۳۵۰۰۰	۳۷۵۰۰۰	۲۱۰۰۰
	خیام	۱۵۸۱۰۹	۱	۵۰۷	۲۰۵۶۴۰	۲۰۵۶۴۰	۱۲۷۴۴۰	۲۱۶۰۰
	بوعلی	۷۴۴۱۷۷	۱۰	۴۳۵	۳۰۰۰	۳۴۵۸۸۰	۲۷۹۲۵۰	۲۰۰۰۰
	فردوسی	۱۲۸۷۰۰	۱۰	۷۰۶	۸۰۴۵	۲۸۶۳۶۰	۱۹۲۸۵۰	۱۶۸۰۰
جمع	فازایی	۱۹۳۳۴۳	۶	۴۷۸	۱۹۳۸۸۰	۱۹۳۸۸۰	۳۹۳۹۵۰	۲۰۴۰۰
	جمع	۲۳۳۰۶۶۲	۲۲۳۵	۷۱۶۵	۱۵۲۶۴۶۲	۲۶۶۱۲۴۱	۵۷۱۹۸۴۵	۵۵۸۱۷۶۳

## ۹- نتیجه‌گیری

به طور کلی از بررسی نمودارها و جداول مطرح شده می‌توان نتیجه‌گیریهای زیر را به دست آورد:

۱. در سناریوی گسل ری، مناطق مرکزی و جنوبی تهران دچار قطعی برق خواهند شد در حالی که در سناریوی گسل شمال، مناطق شمال تهران دچار قطعی برق می‌شوند.

۲. اگر سناریوی گسل ری به عنوان زلزلهٔ محتمل در نظر گرفته شود، تحت این زلزله در مناطق یک، دو، چهار، پنج و بیست و دو، از نظر قطع برق تقریباً مشکلی نخواهیم داشت. همچنین برق بخشی از مناطق سه، شش و بیست و یک قطع خواهد شد، ولی در چهارده منطقه دیگر کل پستهای زمینی از کار خواهند افتاد و با توجه به این نکته که در این مناطق اکثر پستها از نوع زمینی هستند در این مناطق تقریباً خاموشی مطلق خواهیم داشت. با توجه به اینکه نوع بافت شهری در مناطق جنوبی پیچیده‌تر است، دسترسی به آسیب‌دیدگان این مناطق در صورت وقوع زلزله بسیار دشوار خواهد بود.

۳. اگر سناریوی گسل شمال تهران به عنوان زلزلهٔ محتمل در نظر گرفته شود، در این سناریو به غیر از مناطق یک، دو، سه، چهار، پنج و بیست و دو در بقیهٔ مناطق تقریباً مشکلی از نظر قطع برق نخواهیم داشت که از بین مناطق یاد شده فقط در منطقهٔ یک تمامی پستها قطع خواهد شد و در بقیهٔ مناطق یاد شده بخشی از پستهای موجود در منطقه به عملکردشان ادامه خواهند داد. در این سناریو مناطق جنوبی تهران از نظر قطع برق مشکلی نخواهند داشت.

۴. با فرض اینکه احتمال خرابی بیش از ۵۰ درصد باعث قطع عملکرد پست باشد، جداولی در صفحات قبل تهیه شده که بر اساس نتایج به دست آمده در سناریوی گسل شمال تهران ۵۸۷۴۰۰ مشترک دچار قطعی برق خواهند شد. این در حالیست که بر اساس سناریوی ری ۱۰۲۳۶۰۰ مشترک یعنی نزدیک به

دو برابر دچار قطعی برق خواهند شد، که این مقایسه خود نیز گواهی بر اهمیت سناریوی ری نسبت به سایر سناریوهاست.

۵. از آنجایی که مسیرهای ورودی به تهران از سه جهت غرب، شرق و جنوب می‌باشد، خوشبختانه در هر دو سناریو مسیرهای غربی و شرقی ورودی آسیب‌چندانی نخواهند داشت.

## ۱۰- قدردانی

از جناب آقای مهندس خلوتی، کاندیدای دکترای پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله برای ارائه منابع اطلاعاتی در این مقاله سپاسگزاریم.

## ۱۱- مراجع

1. Taylor, C.E. and Ward, D.B. (1981). Seismic risk assessment of electric power systems in Utah and recommendations for risk reduction, Seismic Safety Advisory Council, State of Utah.
2. Solnes, J. (1982). Seismic risk evaluation of electrical power facilities, *Proceedings of the Seventh European Conference on Earthquake Engineering*, 291-299.
3. Savage, W.U. and Anderson, R. (2002). New issues and opportunities for managing earthquake risks to electric power utilities, *Proceedings of the Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering (7NCEE)*, [electronic resource], Boston.
4. Hwang, H.H.M. and Chou, T. (1998). Evaluation of seismic performance of an electric substation using event tree/fault tree technique, *Probabilistic Engineering Mechanics*, **13**(2), 117-124.
5. Chen, L., Nie, L. Wang, X.-F., and Li, J. (2005). Seismic risk analysis of some electric power equipment station in suizhon, *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, **35**(5), 641-645.
6. Shumuta, Y. (2006). Earthquake risk evaluation technologies for electric power substation and distribution equipment, Annual Research Report.

- trical power substation, *Proceedings of the 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
۹. سرور، امیرحسین (۱۳۸۸). بررسی تحلیلی کارایی سیستم جداساز لرزه‌ای به صورت غلتکهای متعامد در ساختمان فلزی منظم دارای قاب خمشی با ارتفاع متوسط، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات.
- Central Research Institute of Electric Power Industry, 12-13.
7. Khalvati, A.H. and Hosseini, M. (2008). Seismic performance of electric substations' equipments in Iran's recent earthquakes, *Proceedings of the 14<sup>th</sup> World Conf. on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
8. Hosseini, M. and Khalvati, A.H. (2008). A new methodology to evaluate the seismic risk of elec-