

ارائه‌ی رابطه‌ی بین پارامترهای لرزه‌ای حرکت زمین با تغییر مکان هدف سازه

علیرضا حبیبی^{۱*}، احسان جامی^۲

۱. دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شاهد

۲. کارشناسی ارشد زلزله، مدرس گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، مریوان

ar.habibi@shahed.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۵/۱۱/۱۲]

تاریخ دریافت: [۹۴/۱۰/۰۳]

چکیده

بیشینه حرکات زمین، مدت تداوم حرکات شدید و محتوای فرکانسی از مهمترین ویژگی‌های زمین لرزه‌ها است که در خسارت لرزه‌ای تاثیر زیادی دارد. هدف از این پژوهش بررسی رابطه‌ی بین تعدادی از پارامترهای لرزه‌ای جنبش نیرومند زمین با تغییر مکان هدف سازه که یک شاخص مهم در ارزیابی عملکرد لرزه‌ای دارد، است. به این منظور، ابتدا تغییر مکان‌های هدف یک سازه فولادی با سیستم قاب خمشی ۹ طبقه تحت ۵۰ زلزله با استفاده از روش طیف ظرفیت تعیین می‌شود. سپس از مفهوم آماری ضریب همبستگی برای پی بردن به رابطه‌ی بین تغییر مکان هدف و پارامترهای لرزه‌ای مربوط به زلزله‌ها، استفاده می‌شود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که بیشینه شتاب زمین، رابطه‌ی ضعیف‌تری را نسبت به بقیه پارامترها از خود نشان می‌دهد؛ در حالی که پارامترهای طیفی همبستگی بیشتری دارند.

واژه‌های کلیدی: ضریب همبستگی، تحلیل استاتیکی غیر خطی، پارامترهای لرزه‌ای، تغییر مکان هدف سازه.

۱- مقدمه

ی پیچیده‌ی زلزله را با تک پارامتری مانند بیشینه شتاب زمین توصیف کرد [2]. الیناس و همکاران به بررسی همبستگی پارامترهای لرزه‌ای با اندیس خسارت ساختمان‌ها پرداختند [3-4]. آنها نشان دادند که پارامترهای انرژی و حوزه‌ی فرکانسی زمین‌لرزه با اندیس خسارت قاب‌های بتنی همبستگی بیشتری دارد. مشاهده خسارات سازه‌ای و غیر سازه‌ای ناشی از زلزله و همچنین پژوهش‌های انجام شده روی سیستم‌های سازه‌ای همبستگی نسبی را بین پارامترهای لرزه‌ای و پاسخ سازه‌ها نشان می‌دهند [4]. اژدری و همکاران به ارزیابی احتمالاتی و مطالعه عدم قطعیت‌ها در نقطه عملکرد سازه‌ها پرداختند [5]. آنها عدم قطعیت‌های مصالح و

آیین‌نامه‌های طراحی و بهسازی لرزه‌ای به طور مستقیم و غیر مستقیم از بیشینه شتاب زمین به عنوان معیاری از ماهیت زلزله با سطح خطر مشخص استفاده می‌کنند. با توسعه‌ی دانش بشری و تکنولوژی، ساختمان‌های با ابعاد و ارتفاع بزرگتر شکل گرفتند. تحت این شرایط محدودیت‌های استفاده از بیشینه شتاب زمین روشن شد. مطالعات فجفر و همکاران نشان داد که بیشینه شتاب زمین معیاری ضعیف از پتانسیل تخریب ناشی از جنبش نیرومند زمین را ارائه می‌دهد [1]. هازنر و همکاران نیز به این نتیجه رسیدند که نمی‌توان پدیده-

غیر خطی^۱ برای بدست آوردن منحنی تغییرات برش پایه در برابر تغییر مکان بام سازه و همچنین از طیف‌های پاسخ الاستیک شتاب‌نگاشت‌ها برای تعیین طیف نیاز الاستیک استفاده شده است. سپس بر اساس ضوابط مندرج در دستورالعمل ATC40، منحنی‌های ظرفیت^۲ و طیف نیاز^۳ کاهش یافته تعیین شده و از تقاطع این دو منحنی، تغییر مکان هدف سازه برای هر نمونه زلزله انتخابی، بدست آمده است. به منظور ارزیابی همبستگی تغییر مکان هدف با پارامترهای لرزه‌ای مختلف در سطح وسیع، ضریب همبستگی محاسبه شده و ارزیابی می‌شود. در ادامه، به تشریح جزئیات مورد نیاز در روش پیشنهادی پرداخته می‌شود.

۲-۱ تعیین تغییر مکان هدف^۴

در یک زمین لرزه، اگر میزان تغییر مکان بام یا طبقات از حد معینی فراتر رود، سازه فرو ریخته تلقی می‌شود، زیرا در موارد بسیاری، جابه‌جایی بزرگ معادل با خسارت وسیع در طبقات سازه است. بنابراین تغییر مکان ساختمان معیار مناسبی برای طراحی سازه‌ها به ویژه در سازه‌های بلند به نظر می‌رسد [8].

در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای متداول، معیار اساسی طراحی یا کنترل ساختمان‌ها، مقاومت است، در حالی که واکنش ساختمان در زمین لرزه‌های بزرگ همراه با عبور از حد تسلیم و تحمل کرنش‌های بزرگ است و مطابق با نمودار نیرو- تغییر مکان سازه در این ناحیه، تغییرات مقاومت ناچیز و کنترل کننده‌ی رفتار ساختمان، تغییر شکل یا تغییر مکان است. هر چند ضریب رفتار برای منظور نمودن و کنترل تغییر شکل‌ها معرفی شده است، اما تعریف آن همیشه یکسان و مورد توافق همگانی نیست. ضمن اینکه به طراح دید روشنی از جابه‌جایی ساختمان نمی‌دهد [8].

با تحلیل‌های غیرخطی و تحت یک زلزله با سطح خطر خاص، می‌توان جابه‌جایی واقعی سازه را تخمین زد [9]. تغییر مکان هدف معمولاً بر اساس تغییر مکان بامی که سازه در

بارگذاری و روش‌های آماری تحلیل نتایج را بررسی کردند. نتایج نشان داد که حساسیت نقطه‌ی عملکرد به بارگذاری، بیشتر از بقیه‌ی پارامترها است. کریستینا و همکاران به بررسی رابطه بین بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات در یک قاب ۹ طبقه بتنی با پارامترهای لرزه‌ای پرداختند. نشان داده شد که شتاب طیفی مربوط به ترک خوردگی بهترین همبستگی را از خود نشان داده است [6]. کلارس و همکاران به بررسی تاثیر عدم قطعیت‌های مدلسازی با تحلیل حساسیت روی ارزیابی رفتار لرزه‌ای قاب‌های بتن مسلح پرداختند که در حالت‌های حدی نزدیک به گسیختگی سازه، متوسط شتاب‌های حداکثر دارای برآوردهای پایینی بوده است [7].

مطالعه‌ی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که با وجود پژوهش‌های ارزشمند انجام شده در زمینه‌ی پارامترهای لرزه‌ای و تغییر مکان هدف، هیچ پژوهشی در مورد بررسی رابطه‌ی آنها با یکدیگر انجام نشده است. هدف از این پژوهش، بررسی رابطه‌ی بین پارامترهای مختلف لرزه‌ای در حوزه‌ی فرکانس و همچنین بیشینه شتاب زمین با تغییر مکان هدف سازه که یکی از پارامترهای مهمی است که به طور گسترده در طراحی بر اساس عملکرد از آن استفاده می‌شود، است.

۲- روش پیشنهادی

برای بدست آوردن رابطه‌ی منطقی بین پارامترهای لرزه‌ای و تغییر مکان هدف سازه، نیاز به یک نمونه‌گیری آماری است که باید به طور تصادفی از جامعه‌ی آماری انتخاب شوند. جامعه‌ی آماری مورد نظر، مجموعه‌ی زلزله‌هایی است که هر کدام ممکن است ویژگی‌های خاصی داشته باشند. در روش پیشنهادی، از مفهوم ضریب همبستگی استفاده شده و برای یک مدل واقعی که تحت اثر زلزله‌های متعددی قرار دارد، همبستگی بین تغییر مکان هدف و پارامترهای لرزه‌ای مختلف حوزه‌ی فرکانس ارزیابی می‌شود. پارامترهای لرزه‌ای بررسی شده شامل طیف‌های پاسخ شتاب (S_a)، سرعت (S_v)، جابه‌جایی (S_d)، پیروید غالب (T_p)، پیروید متوسط (T_m)، نسبت سرعت بیشینه به شتاب بیشینه ($\frac{v_{max}}{a_{max}}$) و شتاب بیشینه زمین (PGA) است. به این منظور ابتدا از تحلیل استاتیکی

1 Pushover analysis

2 Capacity curve

3 Demand spectrum

4 Target displacement

۲-۲- مطالعه همبستگی

در بسیاری از اوقات نیاز به شاخصی است که چگونگی ارتباط بین دو متغیر بر اساس آن اندازه‌گیری شود. یکی از این شاخص‌ها ضریب همبستگی^۱ بین دو متغیر X و Y است. این معیار میزان ارتباط خطی بین متغیر مستقل و وابسته را اندازه‌گیری می‌کند. هرچه مقدار مطلق ضریب بیشتر باشد، همبستگی متغیرها بیشتر و تغییرات آنها (بدون توجه برای تغییرات) به هم نزدیک‌ترند. ضریب همبستگی همواره بین -۱ و ۱ قرار دارد [11]. از لحاظ توصیفی مقادیر مختلف ضریب همبستگی را می‌توان در جدول (۱) مشاهده کرد [11]. در این پژوهش برای بدست آوردن رابطه‌ی بین پارامترهای شتاب لرزه‌ای و تغییر مکان هدف سازه از ضریب همبستگی پیرسون و اسپیرمن استفاده شده است [11] که در ادامه تشریح می‌شوند.

جدول ۱. ارزیابی ضریب همبستگی

$\rho \leq 0/2$	poor very
$0/2 < \rho \leq 0/4$	poor
$0/4 < \rho \leq 0/6$	fair
$0/6 < \rho \leq 0/8$	good
$0/8 < \rho \leq 1$	very good

Table 1. Assessment of correlation coefficient

۲-۲-۱- ضریب همبستگی پیرسون^۲

ضریب همبستگی پیرسون رگرسیون خطی داده‌ها را نشان می‌دهد. این ضریب همبستگی بین دو متغیر X و Y با فرمول زیر قابل بیان است [10]:

$$\rho_{\text{Pearson}} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

1. Correlation coefficient
2. Pearson correlation

زلزله طرح تجربه می‌کند، تعریف می‌شود [9]. یکی از روش‌های مهم تخمین تغییر مکان هدف سازه، روش طیف ظرفیت است که در ATC40 توصیه شده است [9]. شکل (۱) به صورت شماتیک چگونگی تعیین عملکرد بر اساس این روش را نشان می‌دهد. در این روش، نقطه‌ی عملکرد از تلاقی دو طیف شامل طیف ظرفیت سازه که از تحلیل بار افزون تعیین می‌شود و طیف تقاضای غیرخطی که نشان دهنده‌ی سطح خطر خاصی از زلزله است، بدست می‌آید.

شکل ۱. موقعیت نقطه‌ی عملکرد سازه در روش طیف ظرفیت

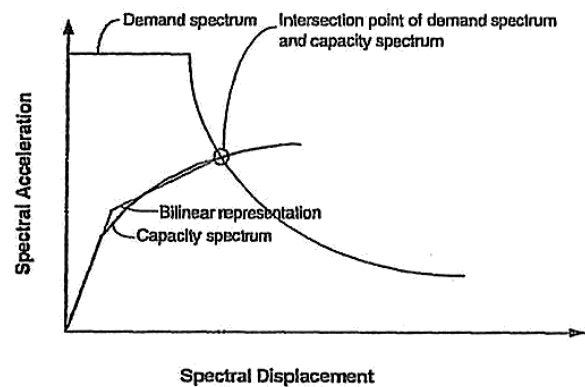


Fig.1. Performance point of structure in the capacity spectrum method

در این پژوهش، برای انجام تحلیل بار افزون، از الگوی بارگذاری توانی برای توزیع نیروهای زلزله در طبقات سازه استفاده می‌شود. بر اساس این الگو، نیروی هر طبقه را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه نمود [10]:

$$F_i = \frac{W_i h_i^k}{\sum_{j=1}^n W_j h_j^k} V \quad (1)$$

که در آن F_i نیروی جانبی وارد بر طبقه i ، W_i وزن طبقه i ، h_i ارتفاع طبقه i از تراز پایه و V برش پایه ساختمان است و مقدار k برابر است با:

$$\begin{cases} k = 1 & T \leq 0/5 \\ k = 2 & T \geq 2/5 \\ k = 0/5T + 0/75 & \text{other periods} \end{cases}$$

شده‌اند، حساس هستند [8]. زلزله‌ها بارگذاری پیچیده‌ای با مولفه‌های حرکت در یک محدوده‌ی وسیعی از فرکانس ایجاد می‌کنند. محتوای فرکانسی، چگونگی توزیع دامنه‌ی حرکات زمین را در فرکانس‌های مختلف مشخص می‌نماید. از آنجا که محتوای فرکانسی زلزله شدیداً تحت تاثیر آثار حرکات آن است، پس تعیین ویژگی‌های زمین‌لرزه بدون در نظر گرفتن محتوای فرکانسی امکان پذیر نیست. به همین دلیل در این پژوهش، از سه پارامتر حوزه فرکانسی متفاوت استفاده شده است. مقادیر طیفی با وجود اینکه به سادگی پارامترهای پیشینه نیستند، ولی در کارهای مهندسی بسیار کاربرد دارند. از میان طیف‌هایی که برای مطالعه جنبش نیرومند زمین به کار برده می‌شوند، طیف پاسخ در کارهای مهندسی کاربرد فراوان دارد و طیف دامنه فوریه نیز به وسیله متخصصین علوم زمین بیشتر به کار می‌رود [13]. همان گونه که پیشتر گفته شد، هر شتابنگاشت زلزله حاوی پارامترهایی است که ویژگی‌های زلزله را مشخص می‌سازند. در ادامه‌ی این بخش، پارامترهای لرزه‌ای بررسی شده در این مطالعه تشریح می‌شود.

۲-۳-۱- طیف پاسخ شتاب، سرعت و جابه‌جایی

طیف پاسخ تنها پیشینه پاسخ سازه‌های مختلف را نشان می‌دهند. پاسخ سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای در مهندسی زلزله برخوردار است و طیف پاسخ از مفیدترین و با اهمیت‌ترین ابزار شناخت ویژگی‌های حرکت نیرومند زمین است [13]. طیف پاسخ بر مبنای پاسخ $x(t)$ یک نوسانگر میرای یک درجه آزادی^۱ به شتاب زمین $a(t)$ تعیین می‌شود. فرض می‌شود که نوسانگر با رفتار خطی و فرکانس طبیعی ω و نسبت میرایی ξ مورد نظر است. مقادیر طیف پاسخ الاستیک بر حسب (ξ, ω) به صورت زیر تعریف می‌شود [13]:

$$S_d(\omega, \xi) = \text{Max}(|x(t)|) \quad (4)$$

$$S_v(\omega, \xi) = \text{Max}(|\dot{x}(t)|) \quad (5)$$

$$S_a(\omega, \xi) = \text{Max}(|\ddot{x}(t)| + |a(t)|) \quad (6)$$

که در آن، X_i و Y_i به ترتیب مقادیر متغیر وابسته و مستقل و \bar{X} و \bar{Y} میانگین این مقادیر است. اگر X و Y مستقل از یکدیگر باشند، آنگاه ضریب همبستگی صفر است ولی عکس این مطلب درست نیست، یعنی اگر ضریب همبستگی صفر باشد ممکن است X و Y مستقل باشند یا نباشند و تنها می‌توان گفت بین X و Y رابطه خطی وجود ندارد. در این پژوهش، Y تغییر مکان هدف سازه و X به عنوان پارامتر لرزه‌ای تعریف می‌شود.

۲-۲-۲- ضریب همبستگی اسپیرمن^۱

هرگاه داده‌ها به صورت رتبه‌ای جمع‌آوری شده باشند یا به رتبه تبدیل شده باشند، می‌توان از همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن استفاده کرد. به این منظور، مقادیر متغیرهای مستقل و وابسته به صورت صعودی یا نزولی مرتب شده و بر اساس رتبه‌ها شماره‌گذاری می‌شوند. چگونگی همبستگی و ارتباط دو متغیر دارای اهمیت می‌باشد و با این روش می‌توان یکی از این دو متغیر را کنترل یا پیش‌بینی کرد. برای سنجش این نوع همبستگی، ضرائب گوناگون به کار می‌روند که یکی از آنها ضریب همبستگی اسپیرمن می‌باشد و به عنوان یکی از روش‌های ناپارامتریک مطرح است [12]. ضریب همبستگی رتبه‌ای برای داده‌های زوجی (x_i, y_i) برای $i = 1, 2, \dots, k$ با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N d_i^2}{N(N^2 - 1)} \quad (3)$$

که در آن، N تعداد داده‌ها و d_i تفاضل بین رتبه‌های هر زوج است. در رابطه‌ی اخیر نیز متغیرهای مستقل، پارامترهای لرزه‌ای و متغیر وابسته، تغییر مکان هدف سازه در نظر گرفته می‌شود.

۲-۳-۳- پارامترهای لرزه‌ای

با یک تحلیل ساده می‌توان پی برد که پاسخ دینامیکی سازه‌ها مانند ساختمان‌ها، پل‌ها و ... به فرکانسی که بارگذاری

بزرگترین مقدار (قدر مطلق) شتاب افقی بدست آمده از آن مولفه‌ی شتاب‌نگاشت است. شتاب‌های افقی معمولاً به علت رابطه‌ی طبیعی آنها با نیروهای اینرسی، برای تشریح حرکات زمین استفاده می‌شوند. در واقع بزرگترین نیروهای دینامیکی حاصل در سازه‌های خیلی صلب رابطه‌ی نزدیکی با شتاب بیشینه زمین دارند [16]. در این پژوهش رابطه‌ی این کمیت به عنوان یکی از پارامترهای لرزه‌ای با تغییر مکان هدف سازه بررسی می‌شود.

۳- مدلسازی و نتایج عددی

همچنان که گفته شد، برای بدست آوردن طیف نیاز غیرخطی برای تعیین نقطه عملکرد سازه و همچنین استخراج پارامترهای لرزه‌ای برای محاسبه ضریب همبستگی، یک مجموعه از زلزله‌ها باید انتخاب شوند. زلزله‌های انتخاب شده در این پژوهش، از نوع زلزله‌های دور از گسل است که فاصله قانونی آنها بالاتر از ۱۵ کیلومتر است تا آثار حوزه نزدیک در آن وارد نشود. این زلزله‌ها دارای بزرگای بین ۶ تا ۷/۴ در مقیاس ریشتر است. بر این اساس، ۵۰ زلزله بر اساس خاک نوع C دسته‌بندی USGS انتخاب شدند که مشخصات آنها در جدول (۲) آورده شده‌اند. با توجه به اینکه حساسیت پاسخ-های سازه به خاک قابل توجه است، پس زلزله‌های در نظر گرفته شده بر اساس خاک محل ساختگاه انتخاب شده‌اند و اولویت‌های بعدی در انتخاب به همسان بودن پارامترهای گسل از جمله نوع گسل و جهت آن اختصاص یافته است. جدول (۳) پارامترهای لرزه‌ای محاسبه شده را برای تمام تحریکات زلزله که در جدول (۲) آمده‌اند، نشان می‌دهد. سازه‌ی بررسی شده یک قاب خمشی فولادی ۹ طبقه SAC نشان داده شده در شکل (۲)، است [17]. در بارگذاری این سازه، از آیین‌نامه IBC استفاده شده است. این سازه، سازه‌ای فولادی با سیستم قاب خمشی و شکل‌پذیری ویژه برای مقابله با نیروهای جانبی در نظر گرفته شده است که بر اساس آیین-نامه UBC97 بر مبنای روش تنش مجاز طراحی شده است. خاک محل احداث، خاک نوع C بر اساس آیین‌نامه IBC در نظر گرفته شده است. تنش جاری شدن همه‌ی تیرها برابر ۲۴۸ مگاپاسکال و تنش جاری شدن کلیه‌ی ستون‌ها برابر با

در این روابط S_a ، S_v و S_d به ترتیب مقادیر طیف‌های پاسخ جابه‌جایی، سرعت و شتاب است که پس از انجام تحلیل دینامیکی به عنوان بیشینه پاسخ‌ها محاسبه می‌شوند.

$$2-3-2) \text{ پرئود غالب } (T_p)$$

پرئود غالب، پرئود ارتعاش متناظر با مقدار بیشینه دامنه طیف فوریه است [13]. یکی از پارامترهای مستقل که نمایانگر محتوای فرکانسی حرکت زمین است، پرئود غالب (T_p) است. برای پرهیز از آثار نامطلوب ناهمواری‌های طیف دامنه‌ی فوریه، معمولاً پرئود غالب از روی طیف هموار شده‌ی فوریه بدست می‌آید [13].

$$2-3-3) \text{ پرئود متوسط } (T_m)$$

محتوای فرکانسی طیف پاسخ به وسیله پرئود غالب و پرئود متوسط تعریف می‌شود [13]. پرئود متوسط (T_m) طیف دامنه‌ی فوریه از معادله زیر قابل تعیین است:

$$T_m = \frac{\sum (C_i^2)}{\sum C_i^2} \quad \text{for } 0.25\text{Hz} \leq f_i \leq 20\text{Hz} \quad (7)$$

که در آن C_i دامنه‌ی فرکانسی در فرکانس f_i است [13].

$$2-3-4) \text{ نسبت سرعت به شتاب حداکثر } \left(\frac{V_{max}}{a_{max}} \right)$$

برای حرکات لرزه‌ای که شامل فرکانس‌های زیادی باشند، مقدار $2\pi \left(\frac{V_{max}}{a_{max}} \right)$ به عنوان پرئود معادل موج هم‌نوا تعریف می‌شود. پس شاخصی خواهد بود که معرف پرئودهای مربوط به مهمترین حرکت زمین است [2]. از این پارامتر می‌توان به عنوان تخمینی از محتوای فرکانسی زلزله استفاده کرد به طوری که هر چه مقدار آن کمتر باشد، نمایانگر محتوای فرکانسی بالاتر است [14].

$$2-3-5) \text{ شتاب بیشینه زمین (PGA)}$$

متداول‌ترین معیار دامنه در یک حرکت زمین، شتاب افقی حداکثر است. شتاب حداکثر برای یک مولفه‌ی حرکت،

^۲ Predominant Period

^۳ Mean Period

شکل ۳. منحنی ظرفیت سازه

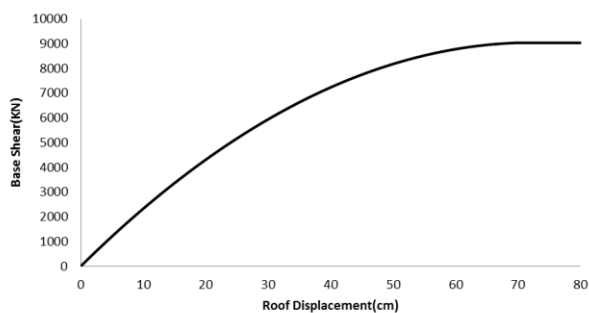


Fig. 3. Capacity curve of structure

در شکل (۴) ضریب همبستگی پیرسون و اسپیرمن برای پارامترهای لرزه‌ای مختلف با هم مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل (۴) می‌توان دید که بیشترین و کمترین ضرایب همبستگی پیرسون و اسپیرمن در برابر تغییر مکان هدف سازه به ترتیب مربوط به طیف پاسخ سرعت و فرکانس غالب است و همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج هر دو تحلیل آماری به هم نزدیک هستند. مقادیر ضریب همبستگی اسپیرمن پارامترهای لرزه‌ای و تغییر مکان هدف در جدول (۵) و ماتریس همبستگی پیرسون پارامترهای لرزه‌ای و تغییر مکان هدف سازه در جدول (۶) خلاصه شده‌اند. با توجه به نتایج جداول (۵ و ۶) می‌توان مشاهده کرد که شدت ارتباط بین بیشینه شتاب زمین و تغییر مکان هدف سازه ضعیف است، در حالی که پارامترهای حوزه فرکانسی مانند فرکانس متوسط دارای رابطه‌ی متوسط و پارامترهای طیفی دارای رابطه‌ی قوی تا بسیار قوی است (بر مبنای دسته‌بندی جدول ۱). از این موضوع می‌توان نتیجه‌گیری نمود که همیشه نمی‌توان برای پاسخ‌گویی به نیازهای لرزه‌ای، به بیشینه شتاب زمین اکتفا نمود. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، ضریب همبستگی پیرسون و اسپیرمن طیف پاسخ سرعت به ترتیب ۰/۸ و ۰/۹ بدست آمده است و با توجه به اینکه همبستگی بسیار قوی بین طیف پاسخ سرعت و تغییر مکان هدف حاصل شده، می‌توان از طیف پاسخ سرعت برای پیشگویی تغییر مکان هدف سازه بررسی شده استفاده نمود.

۳۴۵ مگاپاسکال فرض شده است تا ضابطه‌ی تیر ضعیف و ستون قوی نیز رعایت شود. پیروید اصلی سازه‌ی بررسی شده برابر ۲/۲۷ ثانیه است. در این پژوهش از تحلیل استاتیکی غیر خطی روی مدل سازه‌ای استفاده می‌شود تا بتوان منحنی ظرفیت سازه را بدست آورد. برای انجام کلیه تحلیل‌های غیرخطی از نرم‌افزار کد باز^۱ Opensees استفاده می‌شود [18]. در شکل (۳) می‌توان منحنی ظرفیت سازه را مشاهده کرد. هر کدام از طیف‌های پاسخ الاستیک با میرایی ۰/۵٪ برای شتاببناگشت‌های جدول (۲)، برای محاسبه طیف نیاز، استفاده شده است. با انتقال طیف‌های پاسخ زلزله‌ها و منحنی برش پایه در برابر جابه‌جایی بام به دستگاه^۲ ADRS نقطه‌ی عملکرد سازه در زلزله‌های مختلف، بر اساس روش طیف تعیین شده است. خلاصه‌ی نتایج حاصل از محاسبات عملکردی در جدول (۴) آمده است. مطابق روش پیشنهادی پژوهش، نتایج موجود در جدول (۳) به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده و رابطه‌ی آنها با نتایج موجود در جدول (۴) با استفاده از روابط (۱ و ۲) ارزیابی می‌شود. به این ترتیب ضریب همبستگی بین متغیرهای مستقل (پارامترهای لرزه‌ای) و متغیر وابسته (تغییر مکان هدف سازه) بدست می‌آید.

شکل ۲. هندسه سازه ۹ طبقه بررسی شده

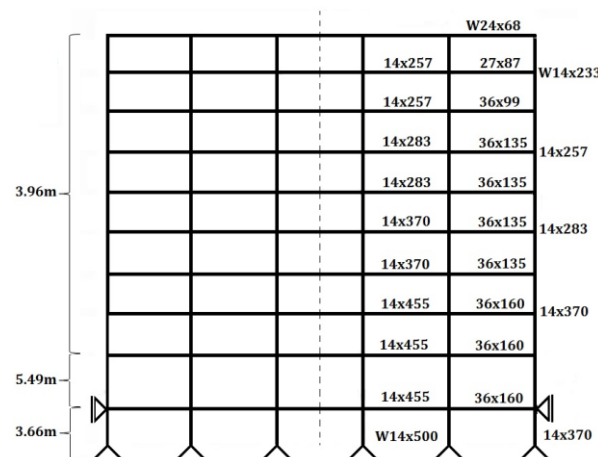


Fig. 2. Geometry of the studied nine-story structure

^۱Open System for Earthquake Engineering Simulation
^۲ Acceleration-Displacement-Response-Spectrum

جدول ۲. اطلاعات شتاب‌نگاشت‌های بررسی شده

N.O	Location	Date	Station	Component	N.O	Location	Date	Station	Component
1	Loma Prieta	1989	Mission San Jose	90	26	N. Palm Springs	1986	San Jacinto - Soboba	0
2	Northridge	1994	Baldwin Hills	90	27	N. Palm Springs	1986	San Jacinto - Soboba	90
3	Imperial Valley	1979	UNAMUCSD 6622	285	28	N. Palm Springs	1986	Hurkey Creek Park	45
4	Imperial Valley	1979	Plaster City	135	29	N. Palm Springs	1986	Hurkey Creek Park	135
5	Loma Prieta	1989	Hollister Diff. Array	255	30	Superstition Hills	1987	El Centro Imp. Co. Cent	90
6	San Fernando	1971	Hollywood Stor FF	180	31	Superstition Hills	1987	Poe Road (temp)	270
7	Loma Prieta	1989	Coyote Lake Dam (Downst)	285	32	Superstition Hills	1987	Superstition Mtn Camera	45
8	Imperial Valley	1979	El Centro Array #12	140	33	Northridge	1994	Centinela St	245
9	Imperial Valley	1979	Cucapah	85	34	Whittier Narrows	1987	Tarzana - Cedar Hill	90
10	Northridge	1994	Hollywood Stor FF	360	35	Northridge	1994	Santa Monica City Hall	90
11	Loma Prieta	1989	Colton Ave	270	36	Hector Mine	1999	Whitewater Trout Farm	65
12	Landers	1992	Coolwater	LN	37	Hector Mine	1999	Whitewater Trout Farm	155
13	Landers	1993	Coolwater	TR	38	Chalfant Valley	1986	Lake Crowley - Shehorn Res	9
14	Imperial Valley	1979	Chihuahua	12	39	Chalfant Valley	1986	Lake Crowley - Shehorn Res	99
15	Imperial Valley	1979	El Centro Array #13	140	40	Coalinga	1983	Parkfield - Fault Zone 1	0
16	Imperial Valley	1979	Westmorland Fire Sta	90	41	Coalinga	1983	Parkfield - Fault Zone 1	90
17	Northridge	1994	Saturn St	LA20	42	Coalinga	1983	Parkfield - Fault Zone 15	0
18	Northridge	1994	Saturn St	LA110	43	Coalinga	1983	Parkfield - Fault Zone 15	90
19	Superstition Hills	1987	Wildlife Liquef. Array	90	44	Coalinga	1983	Parkfield - Fault Zone 3	0
20	Northridge	1994	Univ. Hospital	5	45	Coalinga	1983	Parkfield - Vineyard Cany 1E	0
21	Northridge	1995	Univ. Hospital	95	46	Coalinga	1983	Parkfield - Vineyard Cany 1E	90
22	Loma Prieta	1989	Intern. Airport	0	47	Hector Mine	1999	CDMG 21081 Amboy	90
23	Loma Prieta	1989	Intern. Airport	90	48	Hector Mine	1999	CDMG 21081 Amboy	360
24	Imperial Valley	1979	UNAMUCSD 6622	15	49	Hector Mine	1999	Big Bear Lake - Fire Station	16
25	San Fernando	1971	Hollywood Stor FF	90	50	Hector Mine	1999	Big Bear Lake - Fire Station	106

Table 2. Data of examined accelerograms

جدول ۳. پارامترهای لرزه‌ای حوزه‌ی فرکانس و شتاب بیشینه زمین

N.O	PGA (g)	V/A (sec)	Tm (sec)	Tp (sec)	SA (g)	SV (cm/s)	SD (cm)	N.O	PGA (g)	V/A (sec)	Tm (sec)	Tp (sec)	SA (g)	SV (cm/s)	SD (cm)
1	0.16	0.11	0.93	0.24	0.18	56.59	22.51	26	0.24	0.04	0.29	0.16	0.01	11.32	1.64
2	0.24	0.06	0.51	0.28	0.1	44.4	12.98	27	0.25	0.04	0.28	0.2	0.01	9.59	1.55
3	0.15	0.07	0.36	0.26	0.03	9.8	3.34	28	0.24	0.03	0.24	0.22	0	7.51	0.5
4	0.06	0.1	0.38	0.22	0.02	8.24	2.08	29	0.19	0.05	0.33	0.1	0.01	9.9	0.94
5	0.28	0.13	0.8	0.52	0.12	45.73	15.47	30	0.26	0.16	0.91	0.46	0.27	97.37	7.98
6	0.17	0.09	0.35	0.12	0.1	37.45	12.85	31	0.45	0.08	0.48	0.46	0.16	69.35	20.35
7	0.18	0.13	0.53	0.18	0.11	42.12	13.36	32	0.68	0.05	0.33	0.18	0.1	52.32	12.32
8	0.14	0.13	0.63	0.2	0.12	41.69	14.86	33	0.32	0.07	0.53	0.2	0.14	57.69	17.92
9	0.31	0.12	0.56	0.2	0.12	44.78	14.88	34	0.64	0.04	0.3	0.32	0.02	23.84	1.79
10	0.36	0.08	0.37	0.18	0.05	27.71	6.06	35	0.88	0.05	0.4	0.22	0.29	112.32	37.13
11	0.21	0.18	1.46	0.28	0.2	56.65	25.41	36	0.05	0.1	0.43	0.2	0.02	6.52	2.59
12	0.28	0.09	0.42	0.26	0.05	22.58	6.18	37	0.06	0.16	0.41	0.34	0.02	7.53	2.15
13	0.42	0.1	0.55	0.34	0.1	63.07	11.95	38	0.16	0.04	0.3	0.28	0.01	7.81	1.61
14	0.27	0.09	0.57	0.26	0.08	43.4	10.49	39	0.09	0.06	0.37	0.2	0.01	6.06	1.66
15	0.12	0.13	0.58	0.22	0.09	32.9	10.93	40	0.19	0.12	0.97	0.34	0.13	79.64	15.91
16	0.07	0.29	1.26	0.48	0.09	26.26	10.86	41	0.11	0.17	0.95	0.48	0.08	28.56	9.69
17	0.47	0.07	0.47	0.14	0.1	46	12.53	42	0.17	0.13	0.76	0.44	0.09	38.92	11.44
18	0.44	0.09	0.46	0.18	0	7.5	0.38	43	0.12	0.12	0.63	0.34	0.07	25.79	8.8
19	0.18	0.17	0.91	0.12	0.24	85.84	30.2	44	0.14	0.1	0.66	0.66	0.05	28.09	6.57
20	0.49	0.06	0.37	0.38	0.02	34.84	2.68	45	0.17	0.13	0.81	0.98	0.11	41.81	13.48
21	0.21	0.05	0.3	0.22	0.03	16.09	3.1	46	0.23	0.12	0.79	0.42	0.1	40.57	12.23
22	0.24	0.11	0.53	0.3	0.06	36.16	7.21	47	0.18	0.16	0.78	0.32	0.1	32.66	12.9
23	0.33	0.09	0.55	0.3	0.07	43.98	9.33	48	0.15	0.14	0.64	0.16	0.11	34.63	13.9
24	0.19	0.08	0.39	0.1	0.03	13.81	4.02	49	0.16	0.09	0.4	0.36	0.03	17.52	3.28
25	0.21	0.09	0.54	0.24	0.07	26.95	9.2	50	0.17	0.1	0.43	0.36	0.03	16.57	3.96

Table 3. Seismic parameters of frequency domain and peak ground acceleration

برای تغییر مکان هدف بر حسب طیف پاسخ سرعت پیشنهاد نمود:

$$\Delta = 0.2392S_p + 0.0248 \quad (8)$$

که در آن S_p شتاب طیفی مانند زمان تناوب $2/27$ ثانیه و Δ تغییر مکان هدف بر حسب سانتی متر است.

جدول ۵. ضریب همبستگی اسپیرمن پارامترهای لرزه‌ای و تغییر مکان

هدف			
SV(cm/s)	SD(cm)	SA(cm/s ²)	PGA(g)
0.8	0.7	0.۸	0.۴
TP(sec)	Tm(sec)	V/A(sec)	
0.2	0.۶	0.۴	

Table 5. Spirman correlation coefficient between seismic parameters and target displacement

برای درستی آزمایشی این رابطه، از زلزله Northridge ثبت شده در ایستگاه Santa Monica City Hall با شتاب بیشینه 0.37 برابر شتاب زمین و سرعت طیفی مانند دوره تناوب $2/27$ ثانیه برابر $62/17$ استفاده شده است. تغییر مکان هدف سازه تحت زلزله مذکور با استفاده از تحلیل غیرخطی و روش طیف ظرفیت برابر $18/28$ سانتی متر بدست می‌آید. چنانچه از رابطه ۸ برای تخمین تغییر مکان هدف استفاده شود، مقدار $14/9$ سانتی متر حاصل می‌شود؛ در حالی که اگر تغییر مکان هدف بر اساس شتاب بیشینه تخمین زده شود، مقدار $10/9$ سانتی متر به دست می‌آید. این موضوع نشان می‌دهد که برای تخمین تغییر مکان هدف سازه استفاده از طیف پاسخ سرعت، قابل اطمینان بوده و نتیجه‌ی نزدیک به واقعیتی ارائه می‌کند. شایان ذکر است که این رابطه برای سازه مورد نظر به دست آمده است و اعتبار آن برای سازه‌های دیگر، می‌تواند در پژوهش‌های آتی بررسی شود.

جدول ۶. ماتریس همبستگی پیرسون پارامترهای لرزه‌ای و تغییر مکان هدف

	PGA(g)	V/A(sec)	TP(sec)	Tm(sec)	SA(cm/s ²)	SV(cm/s)	SD(cm)	Target Displacement(cm)
PGA(g)	1.0							
V/A(sec)	-0.4	1.0						
TP(sec)	-0.1	0.4	1.0					
Tm(sec)	-0.3	0.8	0.4	1.0				
SA(cm/s ²)	0.3	0.4	0.1	0.6	1.0			
SV(cm/s)	0.5	0.2	0.1	0.5	0.9	1.0		
SD(cm)	0.3	0.3	0.0	0.5	0.9	0.8	1.0	
Target Displacement(cm)	0.4	0.3	0.2	0.4	0.8	0.9	0.7	1.0

Table 6. Pearson correlation matrix between seismic parameters and target displacement

شکل ۴. مقایسه ضرایب همبستگی اسپیرمن و پیرسون

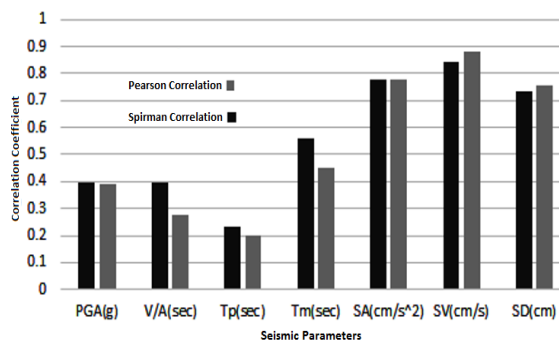


Fig. 4. Comparing between Spirman & Pearson correlation coefficients

جدول ۴. تغییر مکان هدف زلزله‌ها (cm)

N.O	TD(cm)	N.O	TD(cm)
1	8.94	26	2.76
2	9.75	27	2.07
3	2.22	28	1.25
4	3.92	29	1.02
5	11.6	30	20.8
6	4.43	31	13.85
7	12.23	32	12.23
8	10.06	33	13.22
9	17.9	34	2.66
10	13.53	35	23.54
11	16.16	36	1.65
12	9.92	37	3.53
13	19.96	38	1.11
14	12.25	39	1.21
15	6.24	40	17.21
16	4.92	41	12.63
17	10.89	42	10.33
18	0.2	43	5.38
19	12.81	44	9.41
20	8.6	45	9.61
21	3.02	46	11.73
22	13.48	47	12.23
23	11.77	48	8.64
24	2.26	49	8.03
25	15.54	50	5.44

Table 4. Target displacements of earthquakes (cm)

بدین منظور با استفاده از رگرسیون خطی رابطه زیر را می‌توان

۴- نتیجه گیری

نشان داده شد که با توجه به پیچیدگی‌های موجود در تحریک لرزه‌ای، پارامتر بیشینه شتاب زمین در مقایسه با برخی از پارامترهای حوزه‌ی فرکانسی عدم قطعیت بیشتری در تغییر مکان هدف سازه ایجاد می‌کند و برای طراحی لرزه‌ای سازه‌هایی با دوره تناوب متوسط و بالا بر اساس پارامتر بیشینه شتاب زمین، باید دقت و ملاحظه‌ی بیشتری نمود.

در این پژوهش به بررسی رابطه‌ی تغییر مکان هدف سازه و چندین پارامتر لرزه‌ای شامل طیف‌های پاسخ شتاب، سرعت و جابه‌جایی، پیروید غالب، پیروید متوسط، نسبت سرعت بیشینه به شتاب بیشینه و شتاب بیشینه زمین پرداخته شد.

نشان داده شد که برخی از پارامترهای حوزه‌ی فرکانسی مانند فرکانس متوسط و پارامترهای طیفی، در مقایسه با شتاب بیشینه زمین، دارای شدت همبستگی بیشتری با تغییر مکان هدف هستند. این موضوع نشان دهنده‌ی ضعف پارامترهای دامنه‌ای جنبش نیرومند زمین در انعکاس پاسخ سازه‌ها است. فرکانس غالب زلزله کمترین همبستگی را در بین پارامترهای لرزه‌ای از خود نشان داد. از طرف دیگر، نتایج نشان داد که پارامترهای طیفی رابطه قویتری با تغییر مکان هدف سازه دارند. شایان ذکر است که ضعیف بودن همبستگی پارامترهای حوزه فرکانسی بررسی شده در پژوهش با تغییر مکان هدف سازه، به معنی بی‌تاثیر بودن کلیه‌ی پارامترهای موجود در حوزه فرکانسی نیست. شاید با انجام پژوهش‌های گسترده‌تری، بتوان یک پارامتر حوزه فرکانسی مناسب به این منظور معرفی و ارزیابی کرد.

در طراحی‌های عملکردی، از طیف پاسخ شتاب الاستیک طرح برای بدست آوردن طیف نیاز استفاده می‌شود؛ به این ترتیب که با ضرب کردن شتاب طرح در طیف بازتاب، طیف پاسخ شتاب طرح بدست می‌آید در حالی که نتایج نشان داد شتاب بیشینه زمین رابطه‌ی ضعیفی با تغییر مکان هدف سازه دارد و در آیین‌نامه‌ها از یک پارامتر با همبستگی ضعیف (شتاب بیشینه زمین) با تغییر مکان هدف سازه، برای بدست آوردن پارامتر بسیار قوی (طیف پاسخ شتاب) استفاده می‌شود که نمی‌تواند به واقعیت نزدیک باشد. از طرف دیگر، استفاده از طیف پاسخ شتاب نسبت به طیف پاسخ سرعت دارای همبستگی کمتری می‌باشد. با توجه به همبستگی زیاد پارامتر سرعت طیفی با تغییر مکان هدف سازه، رابطه‌ای برای تخمین تغییر مکان هدف سازه بر حسب پارامتر سرعت طیفی ارائه شد و نشان داده شد که نتایج حاصل از آن دارای دقت مطلوبی است.

References

۵- منابع

- [1] Fajfar P., Vidic T. & Fischinger M. 1990 A measure of earthquake motion capacity to damage medium-period structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 9(5), 236-242.
- [2] Arias A., 1970 A measure of earthquake intensity. *Seismic Design for Nuclear Power Plants*. Hansen RJ (Ed.), MIT Press, Cambridge: 438-483.
- [3] Elenas A. 2001 Correlation study between seismic acceleration parameters and damage indices of structures. *Engineering Structures*. 698-704.
- [4] Elenas A. 2000 Correlation between seismic acceleration parameters and overall structural damage indices of buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 93-100.
- [5] Azhdary F. & Shabakhty N. 2011 Probabilistic evaluation of performance point in structures and investigation of the uncertainties. *Journal of Mechanical Engineering Research Vol. 3. (6), pp. 197-208.*
- [6] Cristina C., Guido C., Enrico S. & Ross C. 2012 The variability of deformation demand with ground motion intensity. *Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 28, Pages 59-65.*
- [7] Celarec D. & Dolšek M. 2013 the impact of modelling uncertainties on the seismic performance assessment of reinforced concrete frame buildings. *Engineering Structures, Vol. 52, Pages 340-354.*
- [8] Ghobarah A. 2001 Performance-based design in earthquake engineering: state of development. *Engineering Structures* 23 878-884 159.
- [9] Applied Technology Council (ATC), 1996 Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Final Submittal of SSC

- [15] Rathje E.M., Abrahamson N.A., Bray J.D. 1998 Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 2, pp. 150-159.
- [16] Yaser A., Elnaz K. & Mohammad H.B. 2010 Empirical predictive model for the v_{max}/a_{max} ratio of strong ground motions using genetic programming. *Computers & Geosciences*, Volume 36 Issue 12, Pages 1523-1531.
- [17] Luco N, & Cornell CA. 2000 Effects of connection fractures on SMRF seismic drift demands. *ASCE Journal of Structural Engineering*; 126:127-136.
- [18] Pacific earthquake engineering research center. Open System for Earthquake Engineering Simulation (opensees2.3.2.2). University of California. 2000.
- 96-01 (Proposition 122), ATC-40, Redwood City, California.
- [10] Federal Emergency Management Agency, FEMA356. 1997 *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Building Seismic Safety Council, Washington DC.
- [11] Duglas C. 2006 Montgomery, George .Runger; *Applied Statistics and Probability for Engineering* ; -3rd ed. ISBN 0-471-20454-4.
- [12] Lehman A., O'Rourke N., Hatcher L. & Edward J.S. 2005 *JMP for Basic Univariate and Multivariate Statistics: A Step-by- step Guide*, p.123.
- [13] Kramer, S. L. 1996 *Geotechnical earthquake engineering*. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall
- [14] Lieping Y, Qianli M, Zhiwei M Hong M. & Yan Z. 2013 Numerical and Comparative Study of Earthquake Intensity Indices in Seismic Analysis" *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. vol. 22 issue 4 p. 362-381.

Relationship between seismic parameters of ground motion and target displacement of structure

A.R. Habibi^{1*}, E. jami²

1 Associate Professor, Department of Civil Engineering, Shahed University, Tehran, Iran

2 Department of Civil Engineering, Marivan Branch, Islamic Azad University, Marivan, Iran

ar.habibi@shahed.ac.ir

Abstract

Performance-based seismic design is a relatively new concept in structural engineering and earthquake engineering and is rapidly becoming widely accepted in professional practice. The basic idea of performance-based design is to design a structure so that it will “perform” in a specified manner when subjected to various earthquake levels. Therefore this design method involves a set of procedures by which a building structure is designed in a controlled manner such that its behaviour is ensured at predefined performance levels under earthquake loading. A nonlinear analysis tool is required to evaluate earthquake demands at the various performance levels. Pushover analysis is widely adopted as the primary tool for such nonlinear analysis because of its simplicity compared with dynamic procedures. The essential feature of conventional static pushover analysis is that it is a nonlinear procedure in which monotonically increasing lateral loads along with constant gravity loads are applied to a framework until a control node (usually referred to the building roof) sways to a predefined ‘target’ lateral displacement, or to a ‘target’ base shear, which corresponds to a performance level. The target displacement is the maximum roof displacement likely to be experienced during the design earthquake. Different performance levels have different target displacements, which represent different seismic intensities. The accurate estimation of target displacement associated with specific performance objective affect the accuracy of seismic demand predictions of pushover analysis. The target displacement for a multi degree of freedom (MDOF) system is usually estimated as the displacement demand for the corresponding equivalent single degree of freedom (SDOF) system.

The accuracy of approximate procedures utilized to estimate target displacement depend on the ground motion characteristics such as peak ground acceleration (PGA), peak ground velocities (PGV), acceleration response spectra (Sa) and pseudo velocity response spectra (Sv). Observing the damages of buildings after past earthquakes showed that the damage potential has a little dependence to maximum value of a single parameter such as ground acceleration or the total event duration. In the conventional methods, peak ground acceleration, as a parameter of the earthquake event, is directly/or indirectly used for force-based design and performance-based design. Peak ground motions, duration of strong motions and frequency content are important characteristics of earthquakes that have considerable effect on the earthquake damages. Main objective of the present research is to study the relationship between seismic parameters in the frequency-domain and peak ground acceleration, and the target displacement of the structure. For this purpose, the correlation coefficient between the seismic parameters and the target displacement is calculated and then the relationship between the target displacement and seismic parameters is evaluated based on it. The achieved results show that peak ground acceleration has weak correlation with the target displacement in comparison to the other parameters; whereas frequency domain parameters have better correlation with the target displacement.

Keyword: Correlation coefficient, Pushover analysis, Seismic parameters, Target displacement.