استخراج و ارزیابی پارامتریک توابع پاسخ فرکانسی سازه‌های کشسان و ناکشسان تحت تحریکات پالسی‌شکل زمین

سامان باقری [1*]، حسین حیاتی راد [2]

۱- دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲- دانشجوی دکتری سازه، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- **s_bagheri@tabrizu.ac.ir**

۲- **hossein.raad.hayati@tabrizu.ac.ir**

ویراستاری نشده

چکیده:

در این مطالعه، پاسخ‌های کشسان و ناکشسان سیستم‌های یک درجه آزاد تسلیم‌شونده با سخت‌شوندگی تحت پالس‌های ساده شده زلزله‌های حوزه نزدیک گسل، بصورت توابع پاسخ فرکانسی برای جابجایی نسبی و شتاب کل سازه استخراج و ارزیابی می‌شود. برای شبیه‌سازی حرکات پالس‌گونه زمین، از مدل ریاضی پالس ماورویدیس و پاپاجرجیو استفاده شده است. متغیرهای مورد بررسی در تحلیل پارامتریک شامل شش پارامتر بی‌بعد است که دو مورد برای تحریک ورودی، دو مورد برای خواص سازه و دو مورد آخر نیز برای نسبت بین تحریک و سازه بوده و عبارتند از: تعداد پالس، فاز (شکل) پالس، نسبت میرایی سازه، نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم سازه، نسبت فرکانس تحریک (پالس) به سازه و نسبت دامنه تحریک (پالس) به مقاومت سازه. نتایج حاصل نشانگر این است که علیرغم شباهت توابع پاسخ فرکانسی جابجایی نسبی و شتاب کل در سازه با رفتار کشسان خطی، خصوصیات این دو پاسخ به هنگام رفتار خمیری کاملاً باهم متفاوت است. همچنین نحوه تاثیر پارامترهای مختلف سازه و پالس ورودی بر پاسخ‌ها به هنگام رفتار خطی ویا غیرخطی متفاوت است.

واژگان کلیدی:

تحریکات پالسی‌شکل، زلزله‌های نزدیک گسل، تابع پاسخ فرکانسی، جابجایی، شتاب

۱ ـ مقدمه

طی سالیان گذشته، ماهیت متمایز زلزله‌های حوزه نزدیک گسل از زلزله‌های دور از گسل شناخته شده است. بسیاری از زلزله‌های نزدیک گسل دارای محتوای فرکانسی پایین (پریود بالا) و همچنین پالس‌های شدید سرعت هستند. توان آسیب‌زایی شدید زلزله‌های حوزه نزدیک گسل در سازه‌های مهندسی پس از چند زلزله قوی و مخرب از جمله زلزله‌های نورثریج (۱۹۹۴)، کوبه (۱۹۹۵) و چی‌چی (۱۹۹۹) بیش از پیش آشکار شد.

به دلیل ماهیت ضربه‌ای (پالس‌گونه) اکثر حرکات زمین در حوزه‌های نزدیک گسل، محققان از مدل‌های ریاضی توابع پالسی شکل برای مدلسازی محتوای پریود بالای آن‌ها استفاده کرده‌اند. استفاده از پالس‌های ساده در ارزیابی پاسخ دینامیکی سازه‌ها فقط مربوط به بارگذاری لرزه‌ای نمی‌شود و سابقه‌ای طولانی دارد. به عنوان مثال بیگز[۱] [۱] از پالس‌های یک‌طرفه در اشکال مستطیلی، مثلثی و شیبدار برای ارزیابی پاسخ کشسان و غیرکشسان سیستم‌های تک درجه آزادی (SDOF) استفاده کرد. استفاده از اشکال یک‌طرفه به دلیل شکل موج‌های غیر واقعی برای حرکات زمین دارای کاستی‌هایی است و آنها بیشتر برای شبیه‌سازی بار ناشی از ضربه و انفجار مناسبند.

در ادبیات فنی، چندین مدل ریاضی از تحریکات پالس‌گونه را که برای نشان دادن ویژگی‌های برجسته حرکات زمین در حوزه نزدیک گسل است، می‌توان مشاهده کرد. [۲-۱۰] در ادامه، برخی از این مدل‌ها که کاربرد بیشتری یافته‌اند، به‌طور خلاصه توصیف می‌شوند. ماورودیس و پاپاجرجیو[۲] [۶] یک مدل تحلیلی برای بیان ریاضی خصوصیات زلزله‌های حوزه نزدیک گسل ارائه دادند. از مزیت‌های این مدل تحلیلی آن است که پارامترهای ورودی آن دارای معنای فیزیکی بوده و با استفاده از تعداد زیادی رکورد واقعی زلزله نزدیک گسل واسنجی شده است. علوی و کراوینکلر[۳] [۷] از سه نوع موج مربعی پالس شتاب که می‌توانند بصورت خیلی ساده توسط دو پارامتر پریود پالس و شدت آن تعریف شوند، در مطالعاتشان استفاده کردند. آن‌ها به وجود شباهت بین پاسخ سازه‌های قاب خمشی تحت تحریکات زلزله‌های واقعی نزدیک گسل و تحریکات پالس‌گونه اشاره نموده و نشان دادند که وقتی نسبت پریود اصلی سازه به پریود پالس در محدوده ۰/۳۷۵ تا ۳ باشد، ویژگی‌های مهم پاسخ به زلزله‌های حوزه نزدیک گسل را می‌توان با پالس‌های معادل ساده آن‌ها نشان داد. در سال ۲۰۰۸، هی و آگراوال[۴] [۸] از کاهندگی زمانی تابع نمایی با توان منفی در کنار تابع هارمونیک برای بیان تحلیلی پالس‌های سرعت مشاهده شده در حرکات زمین حوزه نزدیک گسل استفاده کردند. در یک تحقیق دیگر، مصطفی و تاکواکی[۵] [۹] به توسعه مدل‌های ساده تعیّنی (قطعی) و احتمالاتی برای حرکات پالس‌دار زمین در زلزله‌های حوزه نزدیک گسل پرداختند. از مدل قطعی می‌توان برای شبیه‌سازی حرکات پالس‌گونه زمین به عنوان ورودی برای تحلیل تاریخچه زمانی سازه‌های کشسان و غیرکشسان استفاده کرد. ترکیب مدل احتمالاتی با انواع روش‌های قابلیت اطمینان نیز می‌تواند برای ارزیابی قابلیت اطمینان سازه‌های کشسان و غیرکشسان مورد استفاده قرار گیرد.

مطالعه پاسخ سیستم‌های کشسان و ناکشسان تحت حرکات پالس‌گونه زمین از جمله موضوعات مهندسی زلزله می‌باشد که در سالیان اخیر مورد توجه برخی از محققان قرار گرفته است. [۳و۴، ۱۱-۲۰] استفاده از شکل‌های بسیار ساده برای پالس‌های تحلیلی و یا فرض نامیرا یا خطی بودن سیستم اصلی می‌تواند منجر به حصول فرم بسته پاسخ شود؛ [۳و۴و۱۵و۱۶و۲۰] ولی در هنگام استفاده از پالس‌های تحلیلی دقیق‌تر برای سیستم‌های ناکشسان و میرا معمولاً ناگزیر از انجام تحلیل‌های عددی برای حصول پاسخ می‌باشیم. در تحقیق حاضر از پالس تحلیلی ماورودیس و پاپاجرجیو [۶] که از دقت و مقبولیت بالایی برای شبیه‌سازی زلزله‌های نزدیک گسل پالس‌گونه برخوردار است، استفاده می‌شود؛ لذا در ادامه به مطالعاتی که از این مدل تحلیلی برای ارزیابی پاسخ سازه‌ها استفاده کرده‌اند، اشاره می‌شود. همچنین از این به بعد برای رعایت اختصار پالس مذکور تحت عنوان پالس ماورودیس خطاب می‌شود. ماورودیس و همکاران [۱۳] پاسخ کشسان سازه تک درجه آزاد را تحت پالس ماورودیس در حالت خاص نامیرا به صورت تحلیلی و به فرم طیف پاسخ کشسان ارائه کردند. آن‌ها همچنین برای همان سیستم تک درجه آزاد نامیرا با فرض رفتار کشسان–خمیری کامل[۶] (بدون سخت‌شوندگی بعد از تسلیم) پاسخ را بصورت طیف پاسخ ناکشسان تسلیم محاسبه نمودند. الونسو–رودریگز و میراندا[۷] [۱۶] یک حل تحلیلی بسته برای پاسخ سازه تک درجه آزاد با رفتار کشسان خطی تحت پالس ماورودیس ارائه نمودند. آنها با استفاده از همین حل و بر اساس مفهوم برهم نهی مودال، پاسخ و رفتار مدل ساده‌ای از ساختمان‌های چند طبقه بصورت تیر طره خمشی–برشی را ارزیابی نمودند. گو[۸] و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۸ به بررسی اثر مدت دوام[۹] حرکات زمین پالس‌گونه و شناسایی مناسب‌ترین معیار (شاخص) برای آن پرداختند. ارزیابی‌ها بر روی سازه‌های تک درجه آزاد کشسان و کشسان–خمیری تحت پالس

ماورویدیس و همچنین زلزله‌های واقعی نزدیک گسل انجام گردید و پاسخ‌های درنظر گرفته شده عبارت بودند از حداکثر جابجایی نرمال شده و انرژی هیسترزیس نرمال شده. در یک مطالعه دیگر توسط یانگ[۱۰] و همکاران [۱۸] از پالس‌های ساده هارمونیک و پالس ماورویدیس و همچنین رکوردهای زلزله نزدیک گسل واقعی برای تحلیل ابعادی سازه‌های تک درجه آزاد خطی و غیرخطی استفاده شد. آنها صرفاً پاسخ جابجایی حداکثر سازه را مد نظر قرار داده و به ارزیابی مقیاس طول مناسب برای نرمال کردن این کمیت پاسخ پرداختند. در تحلیل ابعادی آنها فقط اثرات تغییر دامنه و پریود پالس ورودی تحلیل گردید و برای مشخصه‌های تعداد و زاویه فاز پالس ماورویدیس مقادیر ثابتی فرض گردید.

در نوشتار حاضر، توابع پاسخ فرکانسی سیستم‌های تک درجه آزاد خطی (کشسان) و غیرخطی (کشسان–خمیری دو خطی با سخت‌شوندگی پس از تسلیم) تحت پالس تحلیلی ماورویدیس به عنوان شبیه‌ساز محتوای پریود بالای زلزله‌های نزدیک گسل، استخراج و بصورت پارامتریک با تغییر تمام پارامترهای تحریک ورودی و سازه ارزیابی می‌شوند. این مطالعه پارامتریک باعث درک فیزیکی بهتر و جامع‌تر از رفتار سیستم‌های خطی و غیرخطی تحت حرکات پالس‌گونه زمین می‌شود. توابع فرکانسی استخراج شده، حالت‌هایی که منجر به تشدید یا تضعیف پاسخ‌ها شده را نمایان می‌سازند و از این رو برای طراحی‌ها بسیار سودمند خواهند بود. همچنین با استفاده از این توابع فرکانسی و بر اساس اهداف طراحی، می‌توان نسبت به انتخاب پارامترهای مناسب و تقریبا بهینه سیستم‌های کشسان و غیرکشسان تحت حرکات پالس‌گونه اقدام نمود. خصوصیات بارز پژوهش حاضر در مقایسه با کارهای مشابه قبلی را می‌توان در سه مورد زیر خلاصه نمود:

الف) پاسخ‌ها بصورت توابع پاسخ فرکانسی بی‌بعد شده مناسب بر روی محدوده فرکانسی وسیع ارائه و ارزیابی می‌شوند. در این صورت امکان مقایسه نتایج با اثرات دینامیکی انواع بارگذاری‌های دیگر فراهم می‌شود.

ب) اثر تمامی پارامترهای تحریک ورودی پالس‌گونه (شامل ۴ مورد: دامنه، فرکانس یا پریود، زاویه فاز و تعداد) و سازه ناکشسان دو خطی (شامل ۴ مورد: فرکانس یا پریود، نسبت میرایی، مقاومت و نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم) بصورت مجموعاً ۶ متغیر بی‌بعد در تحلیل‌های پارامتریک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

ج) علاوه‌بر پاسخ جابجایی سازه، پاسخ شتاب کل آن نیز استخراج و ارزیابی می‌شود. درحالیکه جابجایی معمولاً معیاری برای خرابی اجزای سازه‌ای است، شتاب کل نیز معیار خرابی برخی اجزای غیرسازه‌ای و همچنین معیار آسایش و ایمنی ساکنان می‌باشد.

۲ ـ مدل ریاضی حرکات پالس‌گونه زمین

در این تحقیق، برای شبیه‌سازی پالس‌های سرعت مشاهده شده در زلزله‌های نزدیک گسل از مدل ریاضی پیشنهاد شده توسط ماورویدیس و پاپاجرجیو [۶] استفاده می‌شود. آن‌ها برای بیان ریاضی تاریخچه زمانی پالس سرعت از موجک گابور[۱۱] اصلاح شده استفاده کردند؛ بدین ترتیب که منحنی پوش موجک گابور که یک تابع نمایی (گوسی[۱۲]) است را با یک تابع متقارن زنگوله‌ای شکل دیگر که بیان تحلیلی ساده‌تر دارد (کسینوسی بالارفته)، جایگزین کرده و تاریخچه زمانی پالس سرعت و شتاب زمین را بصورت روابط زیر ارائه کردند.

$$v_g(t)=\begin{cases}\dfrac{A}{2}\left[1+\cos\left(\dfrac{2\pi f_p}{\gamma}(t-t_0)\right)\right]\cos\left[2\pi f_p(t-t_0)+\upsilon\right], & t_0-\dfrac{\gamma}{2f_p}\le t\le t_0+\dfrac{\gamma}{2f_p}\\ 0, & \text{otherwise}\end{cases} \qquad (۱)$$

$$a_g(t)=\begin{cases}-\dfrac{A\pi f_p}{\gamma}\left[\begin{array}{c}\sin\left(\dfrac{2\pi f_p}{\gamma}(t-t_0)\right)\cos\left[2\pi f_p(t-t_0)+\upsilon\right]+\\ \gamma\sin\left[2\pi f_p(t-t_0)+\upsilon\right]\left[1+\cos\left(\dfrac{2\pi f_p}{\gamma}(t-t_0)\right)\right]\end{array}\right], & t_0-\dfrac{\gamma}{2f_p}\le t\le t_0+\dfrac{\gamma}{2f_p}\\ 0, & \text{otherwise}\end{cases} \qquad (۲)$$

در روابط بالا A نشان دهنده بزرگی پالس است که دامنه پالس را کنترل می‌کند؛ f_p فرکانس غالب پالس است (در نتیجه فرکانس دورانی پالس $\omega_p=2\pi f_p$ و پریود پالس $T_p=1/f_p$ می‌باشد)؛ υ زاویه فاز پالس است که $\upsilon=0$ توصیف کننده پالس متقارن و

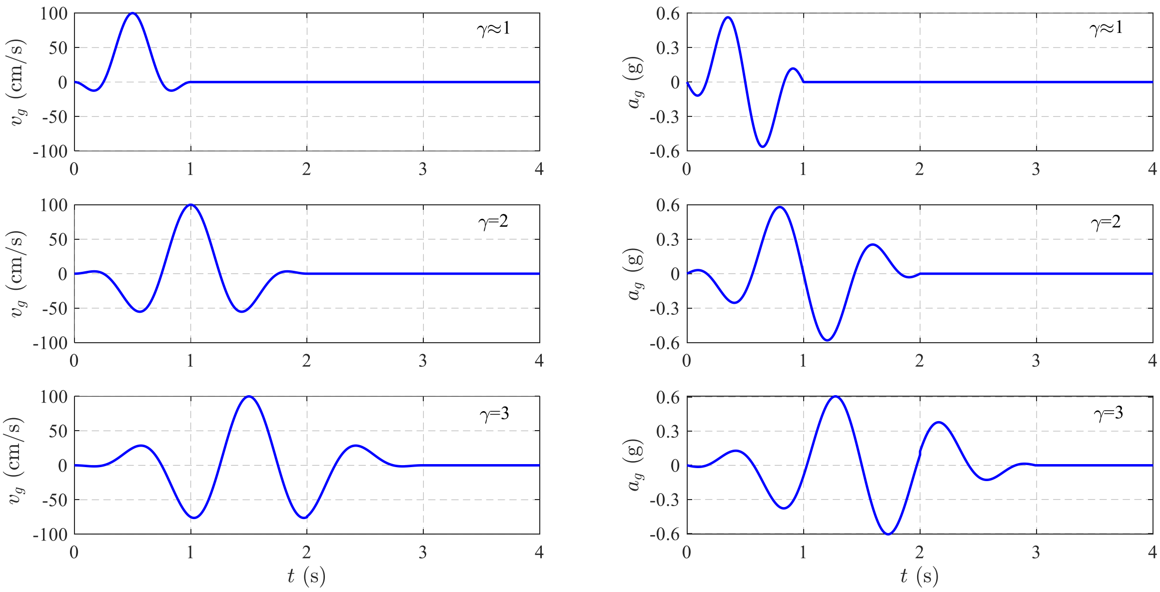
$\upsilon=\pm\pi/2$ توصیف کننده پالس پادمتقارن خواهد بود؛ γ متغیری که مشخصه نوسانی تحریک (تعداد پالس) را تعریف می‌کند ($\gamma>1$) و t_0 زمان متناظر با اوج پالس می‌باشد.

با توجه به اینکه در روابط (۱) و (۲)، زمان کل تحریک پالسی شکل γ/f_p است، می‌توان مبدا زمان را لحظه آغازین تحریک در نظر گرفت (یعنی $t_0=\gamma/2f_p$) و به‌این ترتیب پارامتر t_0 را از رابطه پالس ورودی خارج نمود. در اینصورت سرعت و شتاب پالس ورودی بصورت روابط (۳) و (۴) ساده می‌شود.[۱۳و۱۶] همچنین باید توجه داشت که اگرچه A نشان دهنده بزرگی پالس است ولی در حالت کلی و به ازای همه متغیرهای دیگر پالس (مخصوصا زمانی که $\upsilon\neq0$ باشد)، دقیقا برابر دامنه سرعت نیست؛ در نتیجه $\omega_pA\equiv2\pi f_pA$ نیز برابر حداکثر مقدار شتاب پالس ورودی نیست. بیان حداکثر مقادیر سرعت و شتاب تحریک بصورت تحلیلی مشکل بوده و در هر مورد می‌توان بصورت عددی آنها را محاسبه کرد. در این رابطه، باز قابل توجه است که اکثر مطالعات استفاده کننده از پالس ماورویدیس همانند مراجع [۱۳و۱۷و۱۸] بدون در نظر گرفتن نکته بالا، پاسخ‌های محاسباتی خود را بر حسب پارامتر کنترل کننده دامنه و نه مقدار دقیق دامنه تحریک بیان و بی‌بعد نموده‌اند. اگرچه اینکار به خودی خود دارای ایراد نمی‌باشد ولی دراینصورت نتایج حاصل با نتایج بدست آمده از سایر بارگذاری‌های دینامیکی قابل مقایسه نخواهد بود.

شکل (۱) تاریخچه زمانی سرعت و شتاب زمین را برای پالس ماورویدیس در حالت متقارن ($\upsilon=0$) با پارامترهای $T_p=1\,\mathrm{s}$، $A=100\,\mathrm{cm/s}$ و سه γ مختلف نشان می‌دهد. شتاب با تقسیم بر g بر حسب شتاب ثقل زمین نمایش داده شده است.

$$v_g(t)=\begin{cases}\dfrac{A}{2}\left[1-\cos\left(\dfrac{2\pi f_p}{\gamma}t\right)\right]\cos\left[2\pi f_p t-\pi\gamma+\upsilon\right], & 0\le t\le\dfrac{\gamma}{f_p}\\ 0, & \text{otherwise}\end{cases} \qquad (۳)$$

$$a_g(t)=\begin{cases}\dfrac{A\pi f_p}{\gamma}\left[\begin{array}{c}\sin\left(\dfrac{2\pi f_p}{\gamma}t\right)\cos\left[2\pi f_p t-\pi\gamma+\upsilon\right]-\\ \gamma\sin\left[2\pi f_p t-\pi\gamma+\upsilon\right]\left[1-\cos\left(\dfrac{2\pi f_p}{\gamma}t\right)\right]\end{array}\right], & 0\le t\le\dfrac{\gamma}{f_p}\\ 0, & \text{otherwise}\end{cases} \qquad (۴)$$

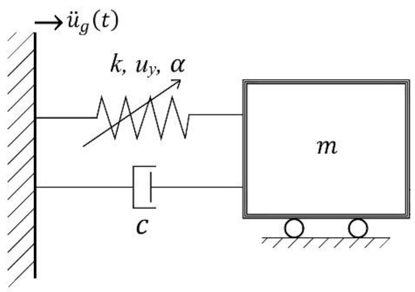


شکل ۱ : تاریخچه زمانی سرعت و شتاب پالس ماورویدیس با $T_p=1\,\mathrm{s}$ ، $A=100\,\mathrm{cm/s}$ ، $\upsilon=0$ و سه γ مختلف

۳ ـ فرمول‌بندی ابعادی پاسخ کشسان و ناکشسان سیستم تک درجه آزاد تحت تحریکات پایه

سیستم یک درجه آزاد در نظر گرفته شده مطابق شکل (۲) شامل جرم m، فنر دوخطی با سختی کشسانی k، جابجایی تسلیم u_y، مقاومت تسلیم $F_y = ku_y$، نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم α و ضریب میرایی c می‌باشد. برای ارتعاش این سیستم در حوزه الاستیک خطی فرکانس طبیعی دورانی و نسبت میرایی به ترتیب برابر $\omega = \sqrt{k/m}$ و $\xi = c/۲m\omega$ است. با در نظر گرفتن شتاب حد مقاومت جاری شدن برابر با $a_y = F_y/m$، این حد شتاب را که به اختصار شتاب تسلیم سازه نیز نامیده می‌شود، می‌توان به شکل زیر نیز بیان کرد:

$$a_y = \omega^2 u_y \tag{۵}$$



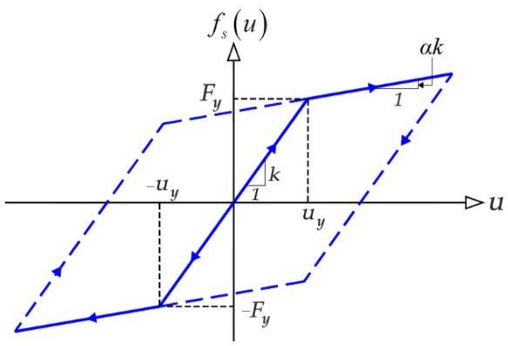
شکل ۲ : سیستم یک درجه آزاد تحت تحریک پایه

معادله حرکت سیستم غیرخطی تحت تحریک پایه زمین بصورت زیر می‌باشد:

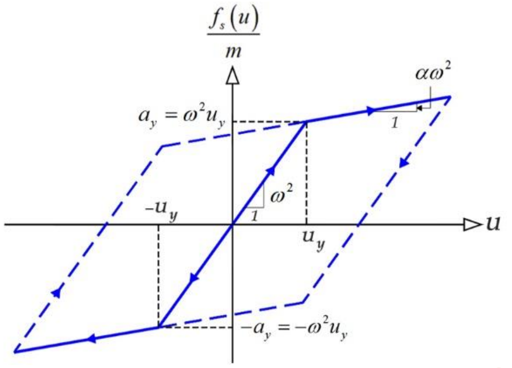
$$\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \frac{f_s(u)}{m} = -\ddot{u}_g(t) \tag{۶}$$

در رابطه (۶)، $\ddot{u}_g(t)$ شتاب زمین بوده و در حالت کلی می‌تواند هر تابعی از زمان باشد. $f_s(u)$ نیز نیروی مقاوم ناشی از خاصیت کشسانی-خمیری سیستم است که در سازه با رفتار کشسان خطی برابر ku بوده و در سازه با رفتار کشسان-خمیری (دوخطی) یک تابع چند ضابطه‌ای مطابق شکل (۳) می‌باشد.

چون در معادله حرکت یعنی رابطه (۶)، تابع $f_s(u)$ با تقسیم بر جرم ظاهر می‌شود، بهتر است با تقسیم کمیت محور قائم در شکل (۳) بر جرم، رابطه نیروی جرم واحد در برابر جابجایی استخراج گردد که این‌کار در شکل (۴) انجام شده است. حال با توجه به شکل (۴) و معادله حرکت نتیجه می‌شود که برای هر تحریک پایه مفروض $\ddot{u}_g(t)$، پاسخ دینامیکی $u(t)$ سازه غیرخطی مدنظر ما فقط به چهار پارامتر ξ، α، ω و u_y بستگی دارد. با توجه به رابطه (۵)، این چهار پارامتر را می‌توان بصورت ξ، α، ω و a_y نیز درنظر گرفت.



شکل ۳ : رابطه نیرو-جابجایی سیستم یک درجه آزاد غیرخطی



شکل ۴ : رابطه نیروی جرم واحد-جابجایی سیستم یک درجه آزاد غیرخطی

تحریک دینامیکی مفروض $\ddot{u}_g(t)$ در یکی از ساده‌ترین حالات خود می‌تواند هارمونیک باشد که فقط دو مشخصه $\ddot{u}_{g0}$ (دامنه) و $\bar{\omega}$ (فرکانس تحریک) را خواهد داشت (یعنی $\ddot{u}_g(t) = \ddot{u}_{g0} \sin \bar{\omega} t$). می‌توان دو پارامتر دامنه و فرکانس تحریک را در قیاس با مقاومت و فرکانس طبیعی سازه بصورت پارامترهای بی‌بعد بصورت زیر تعریف کرد:

$$\bar{a} = \frac{\ddot{u}_{g0}}{a_y} = \frac{\ddot{u}_{g0}}{\omega^2 u_y} \tag{۷}$$

$$\beta = \frac{\bar{\omega}}{\omega} \tag{۸}$$

که $\bar{a}$ نسبت دامنه (حداکثر) شتاب تحریک به شتاب تسلیم سازه یا به عبارتی نسبت اندازه نیروی معادل وارده به مقاومت تسلیم سازه است و β نیز نسبت فرکانس غالب تحریک به فرکانس طبیعی سازه می‌باشد. بنابراین پاسخ بی‌بعد شده سازه غیرخطی تحت تحریک هارمونیک با دو مشخصه دامنه و فرکانس را می‌توان فقط بر اساس چهار پارامتر بی‌بعد ξ، α، $\bar{a}$ و β بیان نمود.

در حالتی که تحریک مفروض $\ddot{u}_g(t)$، بصورت شتاب پالس تحلیلی ماورویدیس باشد، یعنی $a_g(t)$ در رابطه (۴)؛ علاوه‌بر دو

مشخصه دامنه و فرکانس غالب، دو مشخصه γ و υ را هم خواهد داشت. در این حالت $\bar{\omega}$ همان فرکانس غالب پالس (ω_p) است و $\ddot{u}_{g0}$ نیز حداکثر مقدار رابطه (۴) می‌باشد که بر حسب A، ω_p، υ و γ حاصل می‌شود. بنابراین پاسخ بی‌بعد شده سازه با رفتار کشسان-خمیری دو خطی تحت پالس تحلیلی ماورویدیس تابعی از شش پارامتر بی‌بعد خواهد بود: دو پارامتر خصوصیات سازه (ξ و α)، دو پارامتر نسبت تحریک به سازه (β و $\bar{a}$) و دو پارامتر بیان کننده فرم تحریک پالسی (υ و γ). در حالتی که سازه با رفتار کشسان خطی فرض شود، α حذف می‌شود؛ همچنین $\bar{a}=0$ شده و این پارامتر نیز از لیست پارامترهای تعیین کننده پاسخ حذف می‌شود. قابل ذکر است که برای هر نوع تحریک دینامیکی دیگر نیز اگر بتوان تابع زمانی تحریک را بر حسب فرکانس غالب، حداکثر اندازه و یکسری پارامترهای بی‌بعد دیگر بیان نمود، می‌توان پارامترهای تاثیرگذار در پاسخ بی‌بعد شده سازه غیرخطی را مشابه تحلیل فوق نتیجه گرفت.

پاسخ‌های سازه‌ای مدنظر در این پژوهش شامل حداکثر جابجایی نسبی سازه نسبت به زمین ($u_{\max}$) و حداکثر شتاب کل سازه ($\ddot{u}^t_{\max}$) می‌باشد. کمیت اول معمولاً در ارزیابی خرابی اجزای سازه‌ای مهم بوده و کمیت دوم نیز در ارزیابی خرابی برخی اجزای غیرسازه‌ای و همچنین تامین آسایش ساکنین دارای اهمیت است. کمیت دوم را به‌راحتی می‌توان بر حسب حداکثر اندازه (دامنه) شتاب تحریک ورودی یعنی $\ddot{u}_{g0}$ بی‌بعد نمود. اگر بخواهیم کمیت اول را نیز بر حسب پارامتری که دربرگیرنده دامنه شتاب ورودی $\ddot{u}_{g0}$ باشد، بی‌بعد کنیم، با توجه به اینکه جابجایی استاتیکی (δ_{st}) برابر با دامنه نیروی معادل وارده تقسیم بر سختی سازه، در اینجا به شکل $\delta_{st}=\ddot{u}_{g0}/\omega^2$ در می‌آید، می‌توان از δ_{st} برای این منظور استفاده کرد. بنابراین:

$$r_d=\frac{u_{\max}}{\delta_{st}}=\frac{u_{\max}}{\ddot{u}_{g0}/\omega^2} \qquad (۹)$$

$$r_a=\frac{\ddot{u}^t_{\max}}{\ddot{u}_{g0}} \qquad (۱۰)$$

که r_d و r_a به‌ترتیب پاسخ‌های جابجایی نسبی و شتاب کل بی‌بعد شده (نسبت پاسخ‌های جابجایی نسبی و شتاب کل) می‌باشند.

هر یک از پاسخ‌های بی‌بعد شده را می‌توان بصورت تابعی از β به ازای مقادیر مفروض سایر پارامترها بیان کرد که آن را اصطلاحاً تابع پاسخ فرکانسی[۱۳] و منحنی حاصل را منحنی پاسخ فرکانسی گویند. همچنین با توجه به نحوه بی‌بعد کردن پاسخ‌ها که بر حسب اندازه تحریک ورودی ($\ddot{u}_{g0}$) می‌باشد، هر کدام از دو تابع پاسخ فرکانسی جابجایی و شتاب در این حالت در واقع اندازه تابع انتقال[۱۴] برای جابجایی و شتاب هم خواهند بود.

در بارگذاری هارمونیک، تابع پاسخ فرکانسی جابجایی بی‌بعد شده سازه در حالت مانا را ضریب بزرگنمایی دینامیکی[۱۵] نیز می‌نامند. برای سازه تک درجه آزاد با رفتار کشسان خطی تحت بارگذاری هارمونیک، ضریب بزرگنمایی دینامیکی و ضریب انتقال شتاب کل در مراجع دینامیک سازه‌ها [۲۱و۲۲] طبق روابط (۱۱) و (۱۲) ارائه و ارزیابی شده است. این ضرایب در سازه با رفتار کشسان-خمیری نیز می‌تواند با روش‌های تحلیلی تقریبی و یا روش‌های عددی مورد ارزیابی قرار گیرد. [۲۳و۲۶] توابع پاسخ فرکانسی جابجایی و شتاب کل سازه تحت حرکت پالس‌گونه زمین که در پژوهش حاضر با تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی بدست می‌آید، در حالت رفتار خطی سازه قابل مقایسه با نتایج متناظر در بارگذاری هارمونیک مطابق روابط (۱۱) و (۱۲) خواهد بود.

$$r_d^{steady}=\frac{1}{\sqrt{\left(1-\beta^2\right)^2+\left(2\xi\beta\right)^2}} \qquad (۱۱)$$

$$r_a^{steady}=\frac{\sqrt{1+\left(2\xi\beta\right)^2}}{\sqrt{\left(1-\beta^2\right)^2+\left(2\xi\beta\right)^2}} \qquad (۱۲)$$

در اینجا جا دارد در مورد پارامتر بی‌بعد $\bar{a}$ که مطابق رابطه (۷) تعریف شده است، توضیح بیشتری ارائه شود. دیدیم که $\bar{a}$ بصورت نسبت حداکثر شتاب تحریک زمین به شتاب تسلیم سازه و یا به عبارتی بصورت حداکثر اندازه نیروی موثر زلزله به مقاومت تسلیم سازه تعریف شد ($\bar{a}=\ddot{u}_{g0}/a_y \equiv m\ddot{u}_{g0}/ma_y=P_{0_{eff}}/F_y$) که در واقع سطح رفتار غیرخطی سازه را تعیین می‌کند. سازه با مقاومت تسلیم بینهایت منجر به $\bar{a}=0$ و رفتار همواره خطی می‌شود. در حالیکه با افزایش $\bar{a}$ از صفر به مقادیر بیشتر، تراز رفتار غیرخطی افزایش می‌یابد. در بارگذاری استاتیکی، مسلم است که $\bar{a}<1$ منجر به رفتار خطی سازه می‌شود و $\bar{a}=1$ مرز رفتار خطی و غیرخطی خواهد بود، ولی در بارگذاری دینامیکی در محدوده $0<\bar{a}<1$ نیز به خاطر اثرات بزرگنمایی دینامیکی ممکن است شاهد بروز رفتار غیرخطی در برخی فرکانس‌های تحریک نسبی (β) باشیم. برای تشخیص اینکه آیا در یک بارگذاری با فرکانس تحریک مشخص، ورود به ناحیه ناکشسان و رفتار غیرخطی اتفاق افتاده، می‌توان از مقایسه حداکثر مقدار جابجایی با جابجایی تسلیم استفاده کرد. نسبت این

دو تحت عنوان معروف ضریب شکل‌پذیری نیاز (μ) طبق رابطه زیر می‌تواند برای این موضوع استفاده شود:

$$\mu = \frac{u_{\max}}{u_y} \tag{۱۳}$$

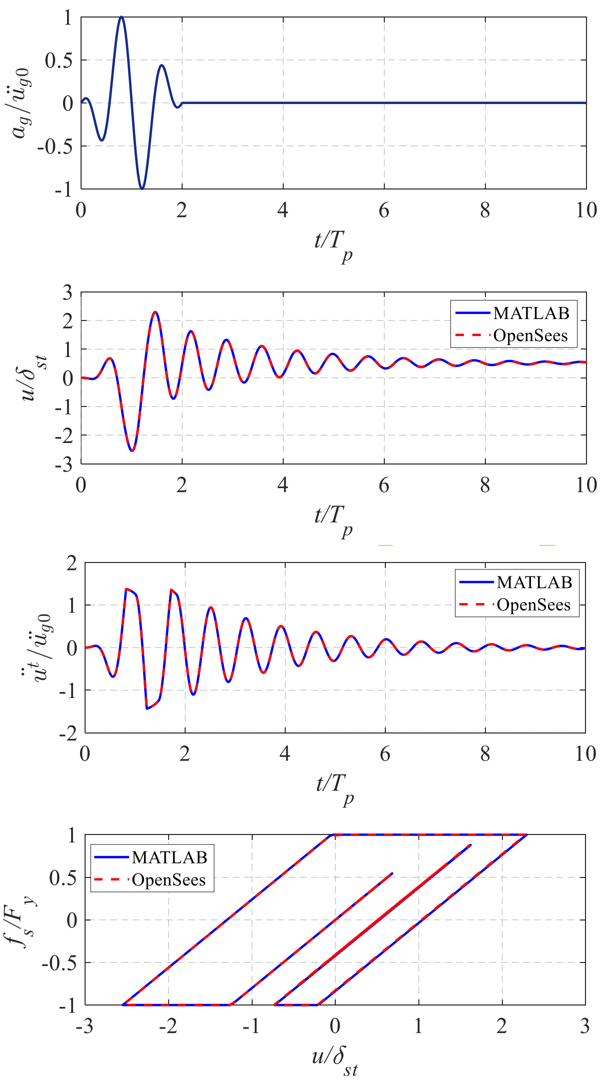
با توجه به تعریف فوق و همچنین روابط (۷) و (۹) می‌توان μ را به شکل زیر نیز نتیجه گرفت:

$$\mu = r_d . \bar{a} \tag{۱۴}$$

قابل توجه است که در بارگذاری استاتیکی و در سازه با رفتار کشسان–خمیری کامل، نیرو بیشتر از مقاومت تسلیم نمی‌تواند تحمل شود؛ یعنی حالت $\bar{a} > ۱$ منجر به پاسخ بی‌کران سازه می‌شود ولی در سازه کشسان–خمیری با سخت‌شوندگی بعد از تسلیم، حالت $\bar{a} > ۱$ می‌تواند با بروز جابجایی‌های بزرگ تحمل گردد. این موضوع بعداً نیز در ارزیابی پاسخ‌های عددی حاصل در این پژوهش مورد توجه قرار خواهد گرفت.

در انتهای این بخش یک نمونه از نتایج عددی تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی سیستم تک درجه آزاد مد نظر تحت پالس ماورویدیس با پارامترهای بی‌بعد انتخابی ارائه می‌شود. برای حل عددی معادلات حرکت، از روش بتای نیومارک در حالت شتاب خطی با کد نویسی در محیط متلب استفاده شده است. در بخش بعد با تغییر تمامی پارامترهای بی‌بعد در محدوده‌های کاربردی، نتایج تحلیل‌های پارامتریک ارائه و ارزیابی خواهد شد. در اینجا دو مشخصه بی‌بعد سازه شامل نسبت میرایی و نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم بصورت $\xi = ۰/۰۵$ و $\alpha = ۰$ درنظر گرفته می‌شود. دو مشخصه بی‌بعد فرم پالس ماورویدیس نیز شامل تعداد پالس و زاویه فاز آن بصورت $\gamma = ۲$ و $\upsilon = ۰$ (معادل با پالس سرعت متقارن) فرض می‌شود. برای پارامترهای نسبی تحریک به سازه نیز $\beta = ۰/۷$ و $\bar{a} = ۰/۸$ انتخاب می‌شود.

نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی بر اساس پارامترهای بی‌بعد بصورت چهار نمودار در شکل (۵) آورده شده است. برای صحت‌سنجی روش حل عددی، نتایج حاصل از نرم‌افزار OpenSees نیز در این شکل ارائه شده است. در نمودار اول این شکل، تاریخچه زمانی شتاب پالس ورودی که بر اساس حداکثر اندازه آن نرمال شده است، بصورت تابعی از زمان نرمال شده (t/T_p) مشاهده می‌گردد. درنظر گرفتن مقادیر صفر در انتهای پالس به منظور اخذ خروجی در فاز بعد از اعمال پالس تحریک که بصورت ارتعاش آزاد میرا خواهد بود، می‌باشد. در دو نمودار بعدی، تاریخچه زمانی جابجایی نرمال شده و شتاب کل نرمال شده ارائه شده است. حداکثر مقادیر (اوج زمانی) این دو نسبت پاسخ، همان r_d و r_a است که به ترتیب ۲/۵۵ و ۱/۴۴ استخراج می‌شود. ارتعاش آزاد میرا در فاز پاسخ بعد از تحریک پالسی‌شکل کاملاً قابل مشاهده می‌باشد. همچنین به دلیل ورود به ناحیه رفتار ناکشسان (خمیری)، تغییر شکل ماندگار[۱۶] به اندازه ۰/۵۲ برابر δ_{st} در سازه اتفاق افتاده است که در فاز ارتعاش آزاد، جابجایی سازه حول این مقدار نوسان می‌کند. در نمودار آخر نیز منحنی هیسترزیس نیرو–جابجایی نرمال شده سازه ارائه شده است که وقوع دوبار تسلیم در جابجایی منفی و یکبار تسلیم در جابجایی مثبت و همچنین ایجاد تغییر شکل ماندگار در انتها قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۵ : نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای سازه تک درجه آزاد تحت پالس ماورویدیس با پارامترهای بی‌بعد $\xi = ۰/۰۵$، $\alpha = ۰$، $\gamma = ۲$، $\upsilon = ۰$، $\bar{a} = ۰/۸$ و $\beta = ۰/۷$.

در انتها قابل ذکر است که علیرغم اینکه در این مثال $\bar{a}=0/8<1$ می‌باشد، یعنی حداکثر اندازه شتاب ورودی کمتر از شتاب تسلیم سازه است، اثرات دینامیکی بار وارده باعث بروز رفتار غیرخطی شده است. در همین مثال با تغییر β به مقادیر خیلی کوچکتر یا بزرگتر و با حفظ مقادیر سایر پارامترها، شاهد رفتار خطی کشسان سازه خواهیم بود.

۴ – ارزیابی پارامتریک توابع پاسخ فرکانسی سیستم تک درجه آزاد تحت پالس ماورویدیس

۴ ــ ۱ ــ ارزیابی کلی و بررسی اثر تراز دامنه نسبی پالس

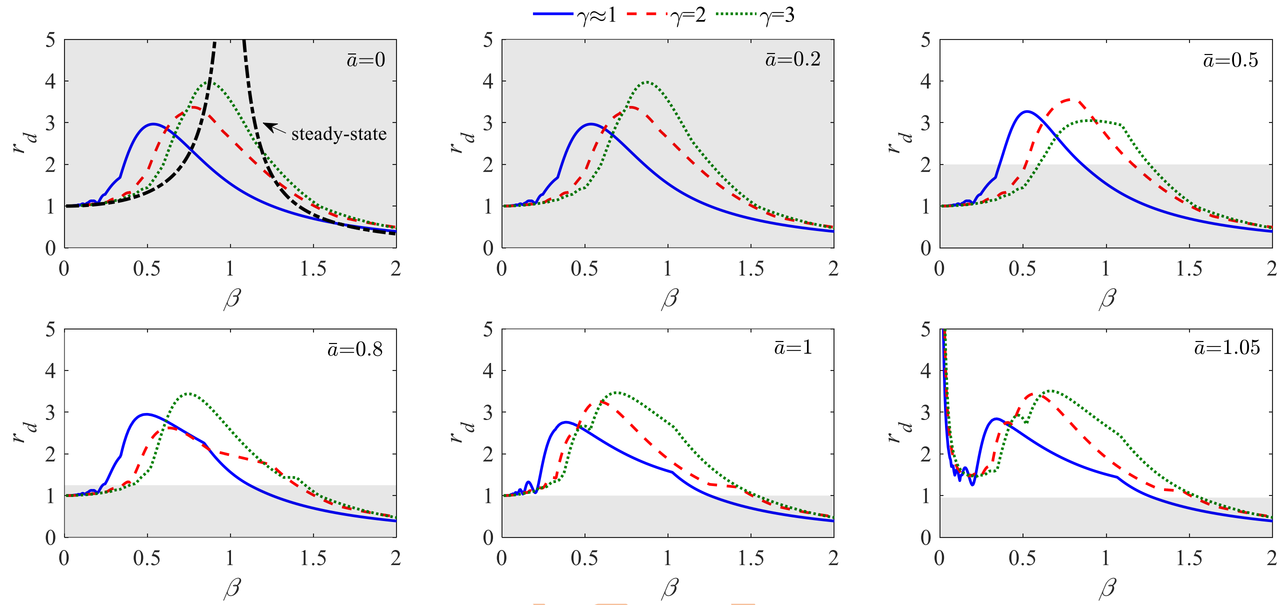
در این قسمت برای انجام ارزیابی کلی از پاسخ‌ها و همچنین بررسی تاثیر پارامتر نسبت دامنه پالس، مقادیر $\bar{a}$ برابر با ۰، ۰/۲، ۰/۵، ۰/۸، ۱ و ۱/۰۵ در نظر گرفته شد که مقدار اول یعنی صفر به معنی و متناظر با رفتار کشسان خطی سیستم در کلیه فرکانس‌های تحریک خواهد بود. همچنین برای پارامتر تعداد پالس (γ) سه مقدار ۱، ۲ و ۳ فرض گردید. سایر پارامترهای پالس و سازه در این قسمت ثابت هستند، یعنی زاویه فاز پالس $\upsilon=0$ (به معنی شکل پالس متقارن)، نسبت میرایی سازه $\xi=0/05$ و نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم سازه $\alpha=0$ (به معنی رفتار کشسان-خمیری کامل) فرض گردیده است.

نتایج عددی حاصل بصورت توابع پاسخ فرکانسی برای نسبت جابجایی (r_d)، نسبت شتاب کل (r_a) و شکل‌پذیری نیاز (μ) در اشکال (۶) الی (۸) آورده شده است. $\mu\leq 1$ حاکی از پاسخ سازه در محدوده رفتار خطی و $\mu>1$ نشان دهنده ورود به حوزه رفتار ناکشسان است. مشاهده می‌شود که برای کلیه حالات $\bar{a}\leq 1$، نقطه آغازین پاسخ‌های فرکانسی نسبت جابجایی و نسبت شتاب کل برابر با یک است؛ یعنی وقتی β به سمت صفر میل می‌کند که به معنی بارگذاری استاتیکی و یا سازه صلب است، مسلماً حداکثر جابجایی سازه همان جابجایی استاتیکی و حداکثر شتاب کل سازه نیز برابر دامنه شتاب وارده خواهد بود. سپس روند کلی توابع فرکانسی صعودی بوده و بعد از قله‌ای در βهای میانی، دوباره با افزایش β نزول کرده و حتی در βهای بزرگ به کمتر از یک هم می‌رسند. در حالت $\bar{a}>1$ برای سیستم کشسان-خمیری کامل ($\alpha=0$) که در این قسمت فرض شده است، زمانیکه نسبت فرکانس تحریک β به صفر میل می‌کند، r_d به سمت بی‌کران شدن می‌رود. زیرا بر سازه کشسان-خمیری کامل با مقاومت تسلیم مشخص نمی‌توان بار استاتیکی بیش از مقاومت آن وارد کرد. درحالیکه اگر سخت‌شوندگی بعد از تسلیم فرض شده باشد، بیکران شدن جابجایی اتفاق نمی‌افتد، هرچند مقادیر جابجایی بسیار بزرگ حاصل می‌شود. مشابه این پدیده در ارزیابی پاسخ فرکانسی حالت مانای سیستم کشسان-خمیری تحت بارگذاری هارمونیک نیز مشاهده شده است. [۲۴]

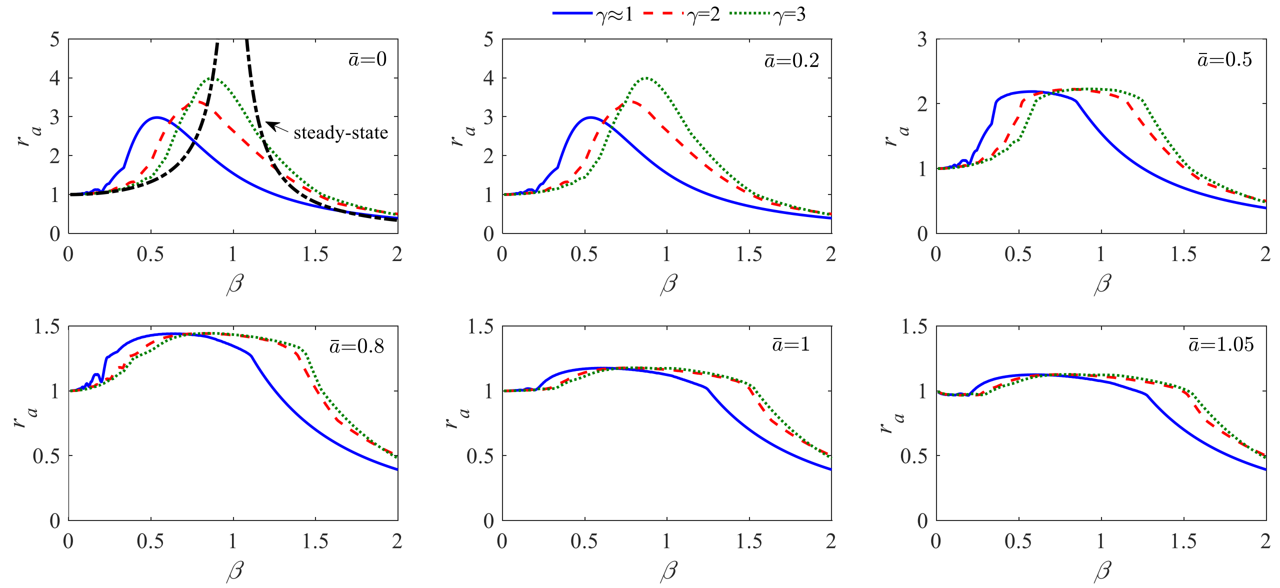
پدیده دیگر قابل توجه در منحنی‌های پاسخ فرکانسی جابجایی، وجود اغتشاشات و قله‌های موضعی در قسمت آغازین منحنی‌ها است. قله‌های موضعی در این نواحی با افزایش پارامتر $\bar{a}$ و در نتیجه افزایش تراز رفتار غیرخطی افزوده می‌شود. قبلاً مشابه این پدیده در پاسخ فرکانسی حالت مانای سازه تسلیم شونده تحت بارگذاری هارمونیک بصورت اثر تشدیدهای فوق‌هارمونیک[۱۷] گزارش و تحلیل شده است. [۲۴-۲۶] در اینجا به دلیل ماهیت متفاوت پاسخ حداکثر حاصل از بارگذاری پالسی گذرا با پاسخ حالت مانای حاصل از بارگذاری هارمونیک، نمی‌توان دقیقاً اثر فوق را نتیجه گرفت، ولی به هر حال تسلیم سازه می‌تواند با ایجاد فرکانس‌های موثر جدید برای سازه، باعث تشدیدهای موضعی گردد. برخی اغتشاشات منحنی‌ها در همین نواحی علیرغم رفتار خطی سازه را همچنین می‌توان به این موضوع ارتباط داد که تحریک زمین در این پژوهش به دلیل ماهیت پالسی گذرای خود، بصورت تک فرکانسی مانا نیست (هرچند فرکانس غالب برای آن توصیف شده است). همچنین برخی شکستگی‌ها در نواحی مختلف پاسخ‌های فرکانسی نیز مشاهده می‌شود که با ارزیابی پاسخ‌های زمانی نتیجه شد عمدتاً مربوط به شیفت (انتقال) حداکثر اندازه پاسخ از مقادیر مثبت به منفی یا برعکس می‌باشد.

در حالت سازه با رفتار کشسان خطی یعنی $\bar{a}=0$، پاسخ‌های حالت مانای تحت بارگذاری هارمونیک نیز از روابط (۱۱) و (۱۲) به اشکال (۶) و (۷) اضافه شده است. در این حالت، پاسخ‌های فرکانسی نسبت جابجایی و نسبت شتاب کل به ترتیب قله‌هایی به اندازه ۱۰/۰۱ و ۱۰/۰۶ دارند (که برای رویت بهتر نتایج تحریکات پالسی، از چارچوب تنظیم‌شده نمودارها بیرون هستند)؛ در حالیکه در بارگذارهای پالسی به حدود ۳ الی ۴ کاهش یافته‌اند. زمان کوتاه بارگذاری پالسی در مقایسه با ماندگاری بارگذاری هارمونیک با دامنه ثابت باعث این کاهش می‌شود. البته باید توجه داشت که پاسخ حالت مانای بارگذاری هارمونیک به دلیل دربرنگرفتن قسمت گذرا، بصورت حداکثر پاسخ حاصل از بارگذاری هارمونیک نیست. تغییر از بارگذاری هارمونیک به پالسی همچنین باعث شیف موقعیت قله‌های پاسخ‌های فرکانسی به سمت چپ (یعنی فرکانس‌های تحریک پایین) می‌شود.

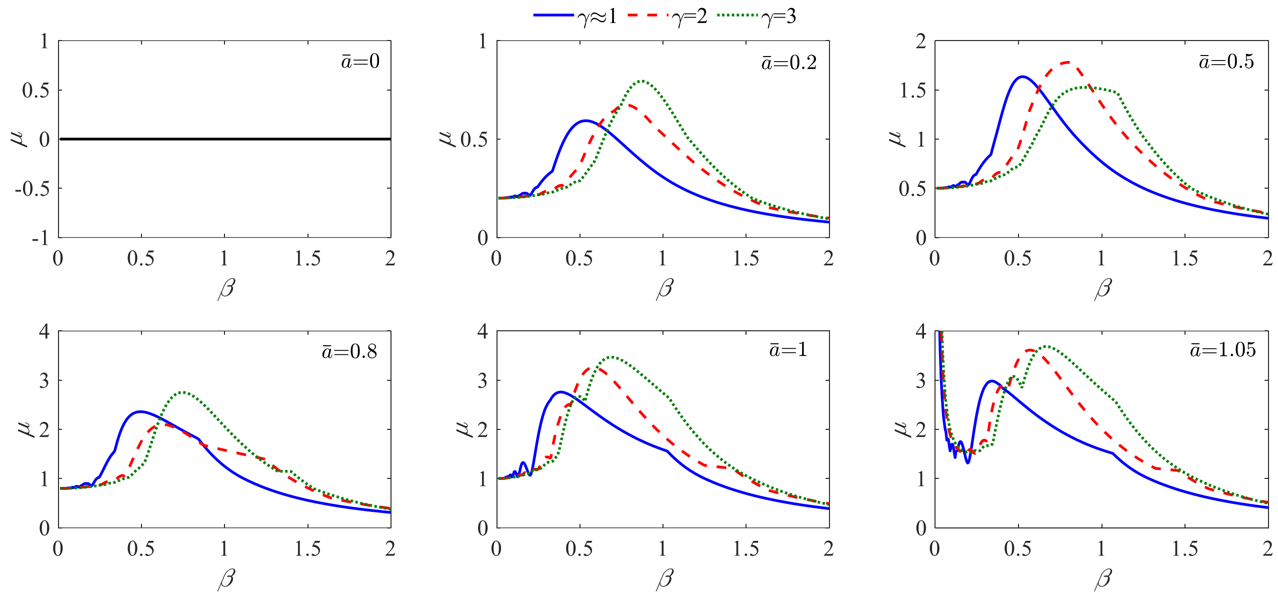
با افزایش $\bar{a}$، امکان و شدت رفتار غیرخطی در سازه افزوده می‌شود. ارزیابی دقیق این موضوع از مشاهده پارامتر پاسخ μ در شکل (۸) حاصل می‌شود. مثلا ملاحظه می‌گردد که به ازای $\bar{a}=۰/۲$، مقادیر شکل‌پذیری نیاز μ در کلیه فرکانس‌های تحریک نسبی β همچنان زیر یک است که به معنی پاسخ کشسان خطی سازه در کلیه این بارگذاری‌ها می‌باشد. در نتیجه منحنی‌های r_d و r_a حاصل در اشکال (۶) و (۷) برای $\bar{a}=۰/۲$ عیناً تکرار منحنی‌های $\bar{a}=۰$ می‌باشد. درحالیکه برای $\bar{a}=۰/۵$، در محدوده میانی βها، μ بزرگتر از یک و پاسخ خمیری حاصل شده است. در $\bar{a}=۰/۸$، این محدوده فرکانسی میانی، گسترده‌تر شده و در $\bar{a}=۱$ و $\bar{a}=۱/۰۵$، به‌غیر از یک قسمت انتهایی، شاهد بروز پاسخ ناکشسان خمیری در فرکانس‌های تحریک مختلف هستیم.



شکل ۶ : منحنی‌های پاسخ فرکانسی برای نسبت جابجایی سازه تک درجه آزاد با رفتار کشسان-خمیری کامل ($\alpha=۰$) و میرایی $\xi=۰/۰۵$ تحت پالس ماورویدیس با شکل متقارن ($\upsilon=۰$) و تعداد پالس γ و نسبت دامنه پالس $\bar{a}$ مختلف



شکل ۷ : منحنی‌های پاسخ فرکانسی برای نسبت شتاب کل سازه تک درجه آزاد با رفتار کشسان-خمیری کامل ($\alpha=۰$) و میرایی $\xi=۰/۰۵$ تحت پالس ماورویدیس با شکل متقارن ($\upsilon=۰$) و تعداد پالس γ و نسبت دامنه پالس $\bar{a}$ مختلف



شکل ۸ : منحنی‌های پاسخ فرکانسی برای ضریب شکل‌پذیری نیاز سازه تک درجه آزاد با رفتار کشسان-خمیری کامل ($\alpha=۰$) و میرایی $\xi=۰/۰۵$ تحت پالس ماوروویدیس با شکل متقارن ($\upsilon=۰$) و تعداد پالس γ و نسبت دامنه پالس $\bar{a}$ مختلف

اگرچه ارائه منحنی‌های μ و مقادیر عددی آن در حالت $\mu>1$ می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد شدت رفتار غیرخطی و میزان جابجایی‌های ناکشسان در اختیار قرار دهد، ولی اگر هدف فقط تشخیص ورود یا عدم ورود به حوزه رفتار غیرخطی و پاسخ ناکشسان باشد (که با مقایسه مقدار μ با عدد یک انجام می‌شود)، می‌توان این تشخیص را از روی منحنی‌های r_d نیز انجام داد. به این ترتیب که با توجه به رابطه (۱۴)، مقایسه μ با یک معادل مقایسه r_d با $1/\bar{a}$ می‌باشد؛ لذا در هر یک از نمودارهای شکل (۶) که برای $\bar{a}$ مشخص رسم شده است، اگر منحنی‌های پاسخ فرکانسی در ناحیه خاکستری شده واقع می‌شوند، به معنی رفتار خطی سازه و در غیر اینصورت به معنی ورود به حوزه خمیری و بروز پاسخ غیرخطی سیستم می‌باشد. در قسمت‌های بعدی ارزیابی پارامتریک نیز از این شیوه برای نشان دادن نوع پاسخ خطی یا غیرخطی سازه استفاده خواهد شد.

با افزایش $\bar{a}$ و بروز رفتار غیرخطی شدیدتر، همواره شاهد کاهش r_a و در نتیجه کاهش شتاب کل انتقالی به سازه هستیم؛ بطوریکه برای تعداد پالس $\gamma=۲$، قله r_a از ۳/۳۹ در رفتار خطی به مقادیر ۲/۲۲، ۱/۴۴، ۱/۱۸ و ۱/۱۳ با افزایش $\bar{a}$ تغییر می‌کند. این درحالی است که r_d و در نتیجه جابجایی سازه با افزایش رفتار غیرخطی سازه می‌تواند کاسته یا افزوده شود؛ بطوریکه مشاهده می‌شود برای تعداد پالس $\gamma=۲$، قله r_d از ۳/۳۷ در پاسخ خطی متناظر با $\bar{a}=۰$ (و نیز $\bar{a}=۰/۲$) به ۳/۵۶ در $\bar{a}=۰/۵$، به ۲/۶۲ در $\bar{a}=۰/۸$ و به ۳/۲۶ در $\bar{a}=۱$ تغییر می‌یابد.

۴ ـ ۲ ـ بررسی اثر تعداد پالس

در اشکال (۶) تا (۸) پارامتر تعداد پالس γ نیز در محدوده متداول برای پالس ماوروویدیس یعنی ۱ تا ۳ متغیر است. این اشکال نشان می‌دهند که در حالت سازه با رفتار خطی (یعنی $\bar{a}=۰$) با افزایش γ، مقادیر حداکثر (قله‌های) منحنی‌های فرکانسی r_d و r_a بالاتر می‌روند، بطوریکه حداکثر r_d از ۲/۹۷ به ۳/۹۷ و حداکثر r_a از ۲/۹۸ به ۳/۹۹ می‌رسد که بیانگر رشد ۳۴٪ است. همچنین موقعیت قله‌ها نیز از چپ به راست منتقل می‌شود. با ملاحظه مجدد پاسخ حالت مانا تحت تحریک هارمونیک، توجیه چنین رفتاری به اینصورت خواهد بود: با افزایش پارامتر تعداد پالس، چرخه‌های بارگذاری و ماندگاری تحریک بیشتر شده و در نتیجه پاسخ نیز شباهت بیشتری به پاسخ حاصل از تحریک هارمونیک با ماندگاری کامل پیدا می‌کند. البته باید توجه داشت که حتی با افزایش γ به سمت بینهایت باز به طور دقیق تحریک هارمونیک با دامنه ثابت حاصل نمی‌شود؛ زیرا در مدل ریاضی تحریک پالسی شکل ماوروویدیس، پوش زنگوله‌ای شکل برای پالس‌های متوالی درنظر گرفته شده است.

از طرف دیگر وقتی رفتار غیرخطی در $\bar{a}$های بزرگتر از صفر اتفاق می‌افتد، همچنان انتقال فرکانس تشدید (موقعیت قله) را از چپ به راست با افزایش پارامتر γ از یک تا سه در هر دو پاسخ r_d و r_a شاهد هستیم؛ درحالیکه از نظر اندازه پاسخ تشدید (قله)، روند مشاهده شده در مورد r_d و r_a باهم و همچنین با حالت رفتار خطی

متفاوت است. به این ترتیب که در ترازهای رفتار غیرخطی مختلف، افزایش γ، موجب تغییرات محسوس در حداکثر مقدار پاسخ فرکانسی شتاب کل نمی‌شود ولی حداکثر مقدار پاسخ فرکانسی جابجایی بصورت‌های مختلف و نه یکسویه تغییر می‌کند.

در اشکال (۶) و (۷) همچنین مشاهده می‌شود که شیفت موقعیت قله‌های پاسخ‌های فرکانسی از چپ به راست با افزایش γ (چه در رفتار خطی و چه غیرخطی) باعث می‌شود که در مقادیر فرکانسی کمی کمتر از نواحی تشدید، معمولاً تعداد پالس کمتر ($\gamma \approx ۱$) موجب پاسخ بزرگتر شود، درحالیکه در مقادیر فرکانسی بیشتر از مقادیر تشدید، تعداد پالس بیشتر ($\gamma = ۳$) پاسخ بزرگتر را رقم زند.

۴ ـ ۳ ـ بررسی اثر زاویه فاز پالس

در این قسمت برای بررسی اثرات زاویه فاز پالس بر پاسخ‌های فرکانسی سازه، برای این پارامتر سه مقدار $\upsilon = ۰, \pi/۴, \pi/۲$ درنظر گرفته می‌شود. مقادیر ۰ و $\pi/۲$ به ترتیب متناظر با حالت پالس متقارن و پادمتقارن می‌باشند. برای مشاهده رفتار خطی و غیرخطی با شدت‌های مختلف نیز $\bar{a} = ۰, ۰/۵, ۱$ فرض می‌شود. تعداد پالس $\gamma = ۲$ بوده و خصوصیات سازه نیز مثل قسمت‌های قبل است، یعنی سازه با رفتار کشسان-خمیری کامل ($\alpha = ۰$) و میرایی $\xi = ۰/۰۵$ فرض شده است.

نتایج حاصل برای پاسخ‌های فرکانسی نسبت جابجایی و نسبت شتاب کل در شکل (۹) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در سازه با رفتار کشسان خطی ($\bar{a} = ۰$)، تغییر زاویه فاز پالس باعث تغییرات بسیار اندک در منحنی‌های r_d و r_a می‌شود، بطوریکه از بین مقادیر اوج (قله‌های) r_d در υهای مختلف، حداکثر آن ۳/۳۷ در $\upsilon = ۰$ بوده و حداقل آن نیز ۳/۱۲ در $\upsilon = \pi/۲$ می‌باشد. برای r_a نیز با همین روند بیشترین و کمترین قله به‌ترتیب ۳/۳۹ و ۳/۱۳ می‌باشد. با بروز رفتار غیرخطی در $\bar{a} = ۰/۵$ و $\bar{a} = ۱$، تاثیر υ بر منحنی r_a همچنان چشمگیر نمی‌باشد ولی در مورد r_d در سطوح رفتار غیرخطی مختلف باعث بروز تغییرات متفاوت می‌شود؛ بطوریکه در $\bar{a} = ۰/۵$، پالس متقارن بیشترین پاسخ را ایجاد می‌کند ولی در $\bar{a} = ۱$ پالس پادمتقارن منجر به بدترین اثر می‌شود.

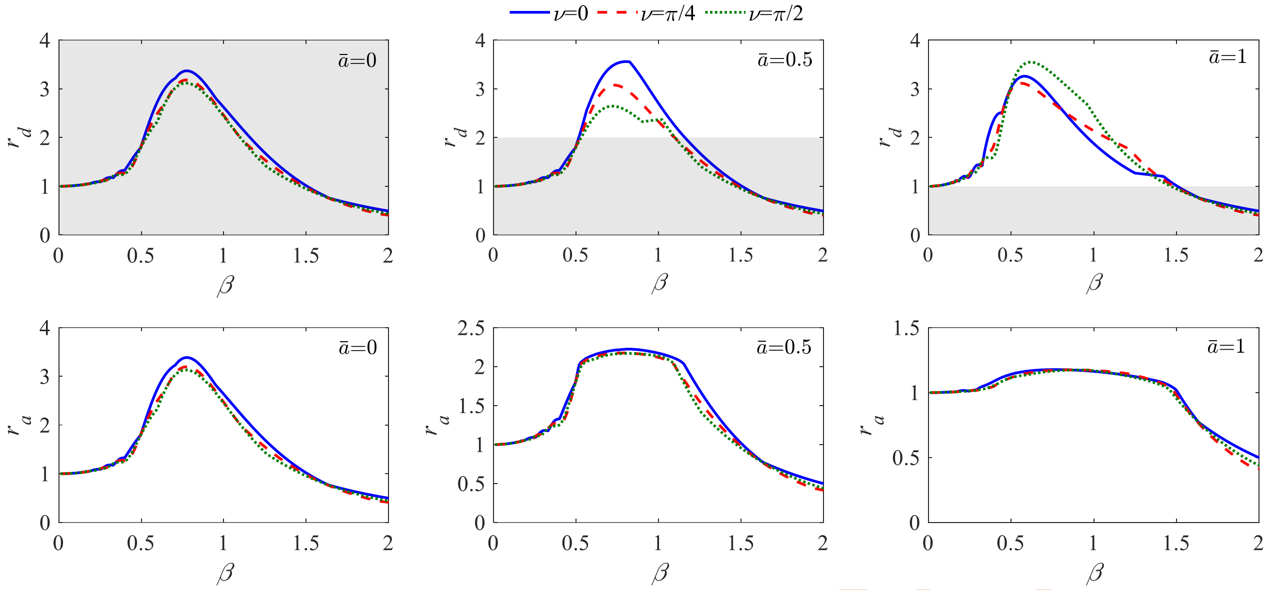
۴ ـ ۴ ـ بررسی اثر نسبت میرایی سازه

برای بررسی اثر نسبت میرایی سازه بر روی توابع پاسخ فرکانسی جابجایی و شتاب کل، سه مقدار $\xi = ۰, ۰/۰۲, ۰/۰۵$ درنظر گرفته می‌شود. مقادیر میرایی کوچک متناظر با وضعیت سازه‌های معمول بوده و تاثیر مقادیر بزرگ میرایی در اینجا بررسی نشده است. مشخصات پالس ورودی $\upsilon = ۰$ و $\gamma = ۲$ و سازه همچنان با رفتار کشسان-خمیری کامل ($\alpha = ۰$) می‌باشد. باز هم سه حالت $\bar{a} = ۰, ۰/۵, ۱$ برای مشاهده رفتار خطی و غیرخطی با شدت‌های مختلف درنظر گرفته شده است.

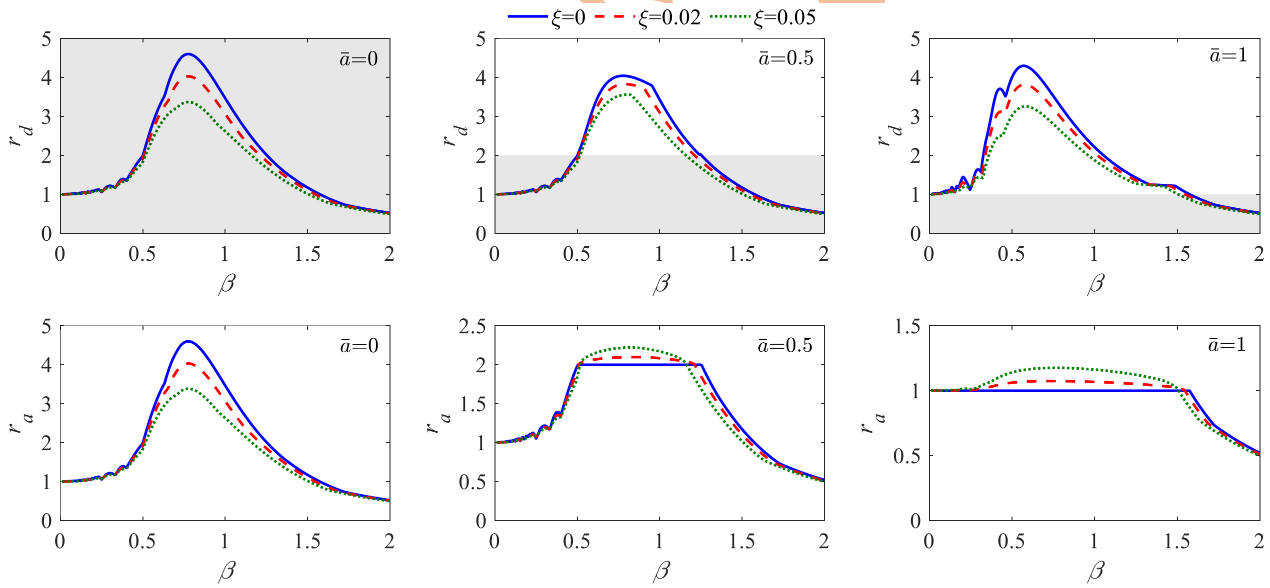
نتایج حاصل برای پاسخ‌های فرکانسی r_d و r_a در شکل (۱۰) رسم شده است. مشاهده می‌شود که در دو منتهی‌الیه نمودارها (β های کوچک و بزرگ)، منحنی‌های مربوط به میرایی‌های مختلف تا حد زیادی بر هم منطبق می‌شوند، درحالیکه در مقادیر میانی β، میرایی سازه در پاسخ‌های حاصل تاثیر مشهودی دارد. این نتایج عددی را می‌توان به صورت زیر توجیه کرد: در βهای خیلی بزرگ زمان دوام بارگذاری پالسی نسبت به زمان تناوب طبیعی سازه اندک بوده و خصوصیات بارگذاری ضربه‌ای حاکم می‌شود که می‌دانیم در این حالت میرایی تاثیر چندانی در پاسخ اوج سازه ندارد.[۲۱و۲۲] همچنین در βهای خیلی کوچک، زمان دوام بارگذاری پالسی نسبت به زمان تناوب طبیعی سازه بسیار زیاد بوده و خصوصیات بارگذاری استاتیکی حاکم است که باز می‌دانیم در این حالت نیز میرایی تاثیری در پاسخ سازه ندارد.

در نواحی میانی فرکانسی، با افزایش میرایی از جابجایی سازه چه در رفتار خطی و چه در رفتار غیرخطی با شدت‌های مختلف، کاسته می‌شود. برای پاسخ شتاب کل نیز در حالت رفتار خطی اینگونه است ولی در صورت بروز رفتار غیرخطی تاثیر میرایی برعکس شده و مشاهده می‌شود که در کلیه فرکانس‌های تحریک متناظر با پاسخ غیرخطی در حالت میرایی صفر برای سازه مفروض که کشسان-خمیری کامل می‌باشد، شتاب کل ثابت نتیجه می‌شود. با توجه به صورت معادله حرکت سیستم یعنی رابطه (۶)، برای سازه نامیرا شتاب کل برابر $f_s(u)/m$ می‌باشد که در حالت رفتار کشسان-خمیری، حداکثر مقدار زمانی آن در صورت بروز تسلیم در سازه برابر با مقدار ثابت F_y/m خواهد بود. بنابراین به ازای فرکانس‌های تحریک مختلف همواره برای r_a مقدار ثابت $F_y/\left(m\ddot{u}_{g0}\right) = 1/\bar{a}$ حاصل می‌شود.

میزان تاثیر مثبت میرایی بر تشدید جابجایی و شتاب سازه با رفتار خطی به این ترتیب است که حداکثر مقدار فرکانسی r_d و r_a در حالت نامیرا به ترتیب از ۴/۶۰ و ۴/۶۰ به ۳/۳۷ و ۳/۳۹ در حالت میرایی ۰/۰۵ کاهش می‌یابد که معادل کاهشی در حدود ٪۲۷ برای هر دو پاسخ است.



شکل ۹ : تاثیر مشخصه فاز پالس (υ) بر منحنی‌های پاسخ فرکانسی نسبت جابجایی و نسبت شتاب کل سازه تک درجه آزاد با رفتار کشسان-خمیری کامل ($\alpha=۰$) و میرایی $\xi=۰/۰۵$ تحت پالس ماورویدیس با تعداد پالس $\gamma=۲$



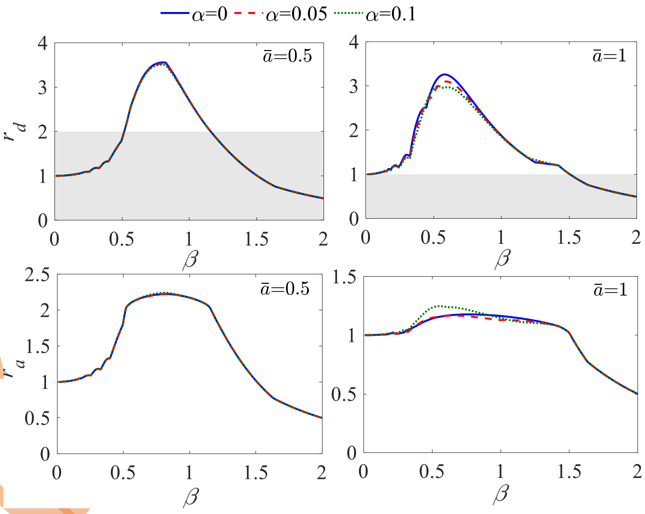
شکل ۱۰ : تاثیر نسبت میرایی (ξ) بر منحنی‌های پاسخ فرکانسی نسبت جابجایی و نسبت شتاب کل سازه تک درجه آزاد با رفتار کشسان-خمیری کامل ($\alpha=۰$) تحت پالس ماورویدیس با شکل متقارن ($\upsilon=۰$) و تعداد پالس $\gamma=۲$

۴ ـ ۵ ـ بررسی اثر نسبت سخت شوندگی بعد از تسلیم سازه

در این قسمت اثر تغییرات نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم سازه در محدوده‌های کم (۰/۱ ~ ۰) که در سازه‌های متداول رایج است، بررسی می‌شود. برای این منظور سه مقدار $\alpha=۰, ۰/۰۵, ۰/۱$ درنظر گرفته شده و مقادیر عددی سایر پارامترهای پالس و سازه مثل بخش‌های پیشین می‌باشد. در اینجا چون سخت‌شوندگی بعد از تسلیم سازه تاثیری در پاسخ‌های سازه‌ای که وارد ناحیه خمیری نمی‌شود، ندارد، حالت $\bar{a}=۰$ نیاز به ارائه و ارزیابی ندارد.

نتایج عددی حاصل برای پاسخ‌های فرکانسی r_d و r_a در شکل (۱۱) آورده شده است. مشاهده می‌شود که برای هر دو حالت $\bar{a}=۰/۵$ و $\bar{a}=۱$ نیز در نواحی فرکانسی که پاسخ خطی حاکم است، جواب‌ها کاملاً برهم منطبقند. در سایر نواحی فرکانسی که پاسخ غیرخطی و ورود به حوزه رفتار خمیری اتفاق می‌افتد، در $\bar{a}=۰/۵$ باز هم تغییرات α تاثیر مشهودی بر روی پاسخ‌ها ندارد ولی در $\bar{a}=۱$ اندک تغییر در قله منحنی‌های پاسخ فرکانسی مشاهده می‌شود. در انتها باز تاکید می‌شود که این تاثیرات ناچیز نسبت

سخت‌شوندگی بعد از تسلیم، در محدوده αهای کم حاصل گردید، والا با افزایش α به مقادیر عددی بالاتر مسلماً شاهد تغییرات قابل توجه خواهیم بود، چراکه $\alpha=۱$ فارغ از هر مقدار مفروض $\bar{a}$، متناظر با رفتار همواره خطی سیستم خواهد بود که تفاوت نتایج آن را با حالت کشسان-خمیری کامل یا دوخطی با سخت‌شوندگی بعد از تسلیم اندک دیده‌ایم.



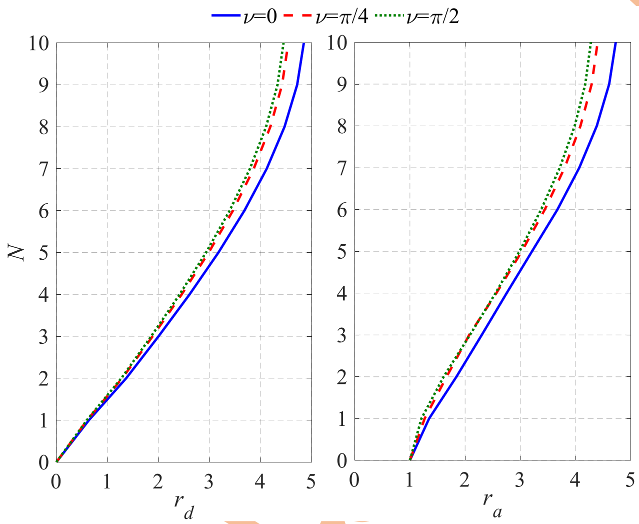
شکل ۱۱ : تاثیر نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم (α) بر منحنی‌های پاسخ فرکانسی نسبت جابجایی و نسبت شتاب کل سازه تک درجه آزاد با میرایی $\xi=۰/۰۵$ تحت پالس ماورویدیس با شکل متقارن ($\upsilon=۰$) و تعداد پالس $\gamma=۲$

۵ ـ ارزیابی توابع پاسخ در یک ساختمان چندطبقه تحت پالس ماورویدیس

در سازه چند درجه آزاد، بسیاری متغیرهای دیگر مثل تعداد طبقات، نحوه توزیع جرم، نحوه توزیع سختی، نحوه توزیع میرایی و نحوه توزیع مقاومت تسلیم نیز به متغیرهای مساله افزوده می‌شود و عملا امکان مطالعه پارامتری با درنظرگرفتن همه پارامترهای حاکم بر مساله — همانند آنچه در مورد سیستم تک درجه آزاد صورت گرفت — وجود نخواهد داشت. در این قسمت صحت برخی نتایج بدست‌آمده برای سیستم تک درجه آزاد همانند تشابه توابع پاسخ جابجایی نسبی و شتاب کل در سازه با رفتار کشسان خطی و یا تاثیر اندک زاویه فاز پالس ورودی بر پاسخ‌های سازه کشسان خطی، در یک ساختمان چندطبقه ارزیابی می‌شود.

برای این منظور از مدل جرم متمرکز و کشسان ساختمان ده طبقه که در مرجع [۲۷] ارائه شده است، استفاده می‌شود. این سازه ساختمانی ده طبقه دارای زمان تناوب مود اول ۲/۰۲ ثانیه و نسبت میرایی ۲٪ در مود اول است. جرم و سختی هرکدام از طبقات سازه به صورت جدولی در مرجع مذکور داده شده است. پریود پالس ورودی $T_p=۳\ \mathrm{s}$ و تعداد پالس $\gamma=۲$ فرض می‌شود. برای زاویه فاز پالس ورودی نیز سه مقدار $\upsilon=۰,\ \pi/۴,\ \pi/۲$ درنظر گرفته می‌شود.

نتایج حاصل به صورت حداکثر جابجایی طبقات و حداکثر شتاب کل طبقات در قالب نسبت‌های بی‌بعد r_d و r_a در شکل (۱۲) ارائه شده است. در این شکل، N بیانگر شماره طبقه است. لازم به‌ذکر است که نسبت شتاب کل در هر طبقه همچنان مطابق رابطه (۱۰) برحسب شتاب زمین نرمال شده است و برای تعریف نسبت جابجایی هر طبقه نیز فرکانس مود اول سازه ω_1 به جای پارامتر فرکانس در رابطه (۹) استفاده شده است. مشاهده می‌شود که مقادیر بدست‌آمده برای توزیع ارتفاعی هر دو پاسخ در این سازه کشسان چندطبقه نیز تا حد زیادی مشابه هم بوده و بیشترین مقدار r_d و r_a در طبقه آخر و در حالت زاویه فاز صفر برای پالس ورودی حاصل می‌شود که به ترتیب برابر با ۴/۸۵ و ۴/۷۳ می‌باشد.



شکل ۱۲ : توزیع ارتفاعی نسبت جابجایی و نسبت شتاب کل سازه ده طبقه تحت پالس ماورویدیس با پریود پالس $T_p=۳\ \mathrm{s}$، تعداد پالس $\gamma=۲$ و سه زاویه فاز مختلف (υ)

همچنین ملاحظه می‌شود که همانند سازه‌های تک درجه آزاد، در حالیکه تاثیر تغییرات زاویه فاز پالس ورودی بر هر دو پاسخ چشمگیر نمی‌باشد، بیشترین پاسخ‌ها از زاویه فاز $\upsilon=۰$ و کمترین پاسخ‌ها از $\upsilon=\pi/۲$ حاصل می‌شود. تغییر زاویه پالس از $\upsilon=۰$ به $\upsilon=\pi/۴$ منجر به کاهش ۵ تا ۶ درصدی در پاسخ جابجایی طبقات می‌شود که حداقل و حداکثر این کاهش به ترتیب مربوط به طبقه اول و آخر است. در صورت تغییر زاویه پالس از $\upsilon=۰$ به $\upsilon=\pi/۲$

باز شاهد فقط کاهش ۶ درصد (طبقه اول) الی ۸ درصد (طبقه آخر) در پاسخ جابجایی طبقات هستیم. در مورد پاسخ شتاب کل نیز تغییرات مابین ۷ درصد (طبقه پنجم) تا ۱۲ درصد (طبقه دوم) می‌باشد.

۶ ـ نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق، استخراج و ارزیابی پارامتریک پاسخ‌های فرکانسی سازه‌های تک درجه آزاد کشسان خطی و ناکشسان دوخطی تحت تحریکات پالس‌گونه زمین می‌باشد. پاسخ‌های مدنظر، جابجایی نسبی و شتاب کل سازه است که بصورت نسبت‌های بی‌بعد شده بر حسب دامنه تحریک ورودی ارائه شده‌اند (یعنی r_d و r_a). ابتدا تحلیل دینامیکی غیرخطی با پارامترهای بی‌بعد تحت تحریکات پالس‌گونه زمین به فرم پالس ماورویدیس فرمولبندی گردید. نتایج تحلیل را کلاً شش متغیر بی‌بعد کنترل می‌کند که دو مورد مربوط به فرم تحریک ورودی، دو مورد مربوط به خواص سازه و دو مورد آخر نیز برای بیان نسبت تحریک به سازه بوده و به‌ترتیب عبارتند از: تعداد پالس (γ)، زاویه فاز پالس (υ)، نسبت میرایی سازه (ξ)، نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم سازه (α)، نسبت فرکانس تحریک (پالس) به فرکانس طبیعی سازه (β) و نسبت دامنه تحریک (پالس) به مقاومت سازه ($\bar{a}$). پاسخ‌های حاصل برای نسبت جابجایی و شتاب کل بصورت توابع فرکانسی یعنی توابعی از β و با تغییر هرکدام از پنج پارامتر بی‌بعد دیگر در محدوده‌های کاربردی ارائه و ارزیابی شده‌اند. در انتها یک نمونه ارزیابی پاسخ‌های سازه چندطبقه نیز ارائه گردید. نتایج حاصل بصورت مفصل در بخش‌های پیشین مورد بحث قرار گرفت که در زیر خلاصه‌ای از اهم آنها ارائه می‌شود:

- درحالیکه در سازه با رفتار کشسان خطی، توابع پاسخ فرکانسی شتاب‌کل و جابجایی شباهت بسیاری به‌هم دارند، در سازه با رفتار خمیری، خصوصیات این دو پاسخ کاملاً باهم متفاوت می‌شوند.
- درحالیکه $\bar{a}=0$ تضمین کننده رفتار کشسان خطی سازه می‌باشد، $\bar{a}>0$ می‌تواند باعث پاسخ ناکشسان در برخی فرکانس‌های تحریک نسبی و یا پاسخ کشسان خطی در برخی نواحی دیگر فرکانسی شود. در بارگذاری دینامیکی، لازم نیست برای حصول رفتار ناکشسان همانند بارگذاری استاتیکی معادل نیازمند $\bar{a}>1$ باشیم.
- در سازه با رفتار کشسان-خمیری کامل یا با سخت‌شوندگی بعد از تسلیم اندک، با افزایش $\bar{a}$ و بروز رفتار غیرخطی شدیدتر، همواره شتاب کل سازه کاهش می‌یابد ولی جابجایی سازه می‌تواند کاسته یا افزوده شود.
- در سازه با رفتار کشسان خطی، حداکثر پاسخ فرکانسی جابجایی و شتاب‌کل با افزایش تعداد پالس در محدوده متداول آن $1<\gamma\leq 3$، همواره افزوده می‌شود (افزایشی در حدود ٪۳۴ برای هر دو پاسخ)، ولی در سازه با رفتار کشسان-خمیری به‌هنگام بروز پاسخ غیرخطی، حداکثر پاسخ فرکانسی شتاب کل مستقل از تعداد پالس ورودی تقریباً ثابت مانده و در مورد جابجایی هم در ترازهای مختلف رفتار غیرخطی تعداد پالس‌های مختلف می‌تواند باعث ایجاد حداکثر پاسخ شود.
- تغییر زاویه فاز پالس ورودی باعث تغییرات چشمگیری در منحنی‌های پاسخ فرکانسی شتاب کل و جابجایی سازه با رفتار کشسان خطی نمی‌شود (حداکثر تغییرات در حدود ٪۸). در صورت بروز رفتار غیرخطی، همچنان تاثیر υ بر r_a اندک است ولی در مورد r_d می‌تواند باعث تغییرات چشمگیری گردد.
- در ابتدا و انتهای منحنی‌های پاسخ فرکانسی، تغییر میرایی سازه تاثیری بر پاسخ‌ها ندارد. در نواحی میانی فرکانسی، با افزایش میرایی از جابجایی سازه چه در رفتار خطی و چه در رفتار غیرخطی با شدت‌های مختلف، کاسته می‌شود. برای پاسخ شتاب کل نیز همین روند در حالت رفتار خطی مشاهده می‌شود ولی درصورت بروز رفتار غیرخطی تاثیر میرایی می‌تواند برعکس باشد. با افزایش میرایی از صفر به ۰/۰۵، میزان تاثیر مثبت آن بر تشدید جابجایی و شتاب سازه با رفتار خطی در حدود ٪۲۷ است.
- ارزیابی پاسخ‌های یک سازه ده‌طبقه نشان داد که همانند نتایج حاصل از سیستم‌های تک درجه آزاد، توابع پاسخ جابجایی و شتاب کل نرمال شده در سازه چند درجه آزاد با رفتار کشسان خطی مشابه هم بوده و تاثیر تغییر زاویه فاز پالس ورودی بر هر دو پاسخ کشسان سازه اندک می‌باشد.

پانوشت‌ها

۱. Biggs
۲. Mavroeidis and Papageorgiou
۳. Alavi and Krawinkler
۴. He and Agrawal
۵. Moustafa and Takewaki
۶. Elastic-perfectly plastic
۷. Alonso-Rodriguez and Miranda
۸. Guo

۹. Duration effect
۱۰. Yang
۱۱. Gabor
۱۲. Gaussian
۱۳. Frequency Response Function (FRF)
۱۴. Transfer Function (TF)
۱۵. Dynamic Magnification Factor (DMF)
۱۶. Permanent deformation
۱۷. Ultra-harmonic resonances

منابع (References)

۱. Biggs, J.M., ۱۹۶۴. Introduction to Structural Dynamics, McGraw-Hill, New York.

۲. Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W. and Wald, D.J., ۱۹۹۵. Near-source ground motion and its effects on flexible buildings. *Earthquake Spectra*, ۱۱(۴), pp. ۵۶۹-۶۰۵. doi.org/۱۰,۱۱۹۳/۱,۱۵۸۵۸۲۸.

۳. Makris, N., and Chang, S.P., ۲۰۰۰. Response of damped oscillators to cycloidal pulses. *Journal of Engineering Mechanics*, ۱۲۶(۲), pp. ۱۲۳-۱۳۱. doi.org/۱۰,۱۰۶۱/(ASCE)۰۷۳۳-۹۳۹۹(۲۰۰۰)۱۲۶:۲(۱۲۳).

۴. Mylonakis, G., and Reinhorn, A.M., ۲۰۰۱. Yielding oscillator under triangular ground acceleration pulse. *Journal of Earthquake Engineering*, ۵(۲), pp. ۲۲۵-۲۵۱. doi.org/۱۰,۱۰۸۰/۱۳۶۳۲۴۶۰۱۰۹۳۵۰۳۹۳.

۵. Menun, C., and Fu, Q., ۲۰۰۲. An analytical model for near-fault ground motions and the response of SDOF systems. *In Proceedings, 7th US National Conference on Earthquake Engineering*, Massachusetts, Boston.

۶. Mavroeidis, G.P., and Papageorgiou, A.S., ۲۰۰۳. A mathematical representation of near-fault ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, ۹۳(۳), pp. ۱۰۹۹-۱۱۳۱. doi.org/۱۰,۱۷۸۵/۰۱۲۰۰۲۰۱۰۰.

۷. Alavi, B., and Krawinkler, H., ۲۰۰۴. Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, ۳۳(۶), pp. ۶۸۷-۷۰۶. doi.org/۱۰,۱۰۰۲/eqe.۳۶۹.

۸. He, W.L., and Agrawal, A.K., ۲۰۰۸. Analytical model of ground motion pulses for the design and assessment of seismic protective systems. *Journal of Structural Engineering*, ۱۳۴(۷), pp. ۱۱۷۷-۱۱۸۸. doi.org/۱۰,۱۰۶۱/(ASCE)۰۷۳۳-۹۴۴۵(۲۰۰۸)۱۳۴:۷(۱۱۷۷).

۹. Moustafa, A., and Takewaki, I., ۲۰۱۰. Deterministic and probabilistic representation of near-field pulse-like ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ۳۰(۵), pp. ۴۱۲-۴۲۲. doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.soildyn.۲۰۰۹,۱۲,۰۱۳.

۱۰. Waezi, Z., and Balzadeh, S., ۲۰۲۲. Simulation of near-field pulse-like ground motions using a correlated bimodal fractional stochastic model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ۱۶۱, pp. ۱۰۷۴۳۴. doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.soildyn.۲۰۲۲,۱۰۷۴۳۴.

۱۱. Cuesta, I., and Aschheim, M.A., ۲۰۰۴. The use of simple pulses to estimate inelastic response spectra. *Journal of Earthquake Engineering*, ۸(۶), pp. ۸۶۵-۸۹۳. doi.org/۱۰,۱۰۸۰/۱۳۶۳۲۴۶۰۴۰۹۳۵۰۵۱۲.

۱۲. Makris, N., and Black, C.J., ۲۰۰۴. Dimensional analysis of rigid-plastic and elastoplastic structures under pulse-type excitations. *Journal of Engineering Mechanics*, ۱۳۰(۹), pp. ۱۰۰۶-۱۰۱۸. doi.org/۱۰,۱۰۶۱/(ASCE)۰۷۳۳-۹۳۹۹(۲۰۰۴)۱۳۰:۹(۱۰۰۶).

۱۳. Mavroeidis, G.P., Dong, G. and Papageorgiou, A.S., ۲۰۰۴. Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, ۳۳(۹), pp. ۱۰۲۳-۱۰۴۹. doi.org/۱۰,۱۰۰۲/eqe.۳۹۱.

۱۴. Makris, N., and Psychogios, T., ۲۰۰۶. Dimensional response analysis of yielding structures with first-mode dominated response. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, ۳۵(۱۰), pp. ۱۲۰۳-۱۲۲۴. doi.org/۱۰,۱۰۰۲/eqe.۵۷۸.

۱۵. Mylonakis, G., and Voyagaki, E., ۲۰۰۶. Yielding oscillator subjected to simple pulse waveforms: numerical analysis & closed-form solutions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, ۳۵(۱۵), pp. ۱۹۴۹-۱۹۷۴. doi.org/۱۰,۱۰۰۲/eqe.۶۱۵.

۱۶. Alonso-Rodríguez, A., and Miranda, E., ۲۰۱۵. Assessment of building behavior under near-fault pulse-like ground motions through simplified models. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ۷۹, pp. ۴۷-۵۸. doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.soildyn.۲۰۱۵,۰۸,۰۰۹.

۱۷. Guo, G., Yang, D., and Liu, Y., ۲۰۱۸. Duration effect of near-fault pulse-like ground motions and identification of most suitable duration measure. *Bulletin of Earthquake Engineering*, ۱۶, pp. ۵۰۹۵-۵۱۱۹. doi.org/۱۰,۱۰۰۷/s۱۰۵۱۸-۰۱۸-۰۳۸۶-۹.

۱۸. Yang, D., Guo, G., Liu, Y., and Zhang, J., ۲۰۱۹. Dimensional response analysis of bilinear SDOF systems under near-fault ground motions with intrinsic length scale. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ۱۱۶, pp. ۳۹۷-۴۰۸. doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.soildyn.۲۰۱۸,۱۰,۰۳۴.

۱۹. Konstandakopoulou, F., and Hatzigeorgiou, G., ۲۰۲۰. Constant-ductility inelastic displacement, velocity and acceleration ratios for systems subjected to simple pulses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ۱۳۱, pp. ۱۰۶۰۲۷. doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.soildyn.۲۰۱۹,۱۰۶۰۲۷.

۲۰. Akehashi, H., and Takewaki, I., ۲۰۲۲. Closed-form critical response of undamped bilinear hysteretic MDOF system under pseudo-double impulse for estimating resonant response under one-cycle sine wave. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, ۱۵۷, pp. ۱۰۷۲۵۴. doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.soildyn.۲۰۲۲,۱۰۷۲۵۴.

۲۱. Clough, R.W., and Penzien, J., ۲۰۰۳. Dynamics of Structures. ۳rd Edition, Computer and structure, Inc., Berkeley.

۲۲. Chopra, A.K., ۲۰۱۲. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering. ۴th Edition, Prentice Hall, USA.

۲۳. Caughey, T.K., ۱۹۶۰. Sinusoidal excitation of a system with bilinear hysteresis. *Journal of Applied Mechanics*, ۲۷(۴), pp. ۶۴۰–۶۴۳. doi.org/۱۰,۱۱۱۵/۱,۳۶۴۴۰۷۵.

۲۴. Miller, G.R., and Butler, M.E., ۱۹۸۸. Periodic response of elastic-perfectly plastic SDOF oscillator. *Journal of Engineering Mechanics*, ۱۱۴(۳), pp. ۵۳۶-۵۵۰. doi.org/۱۰,۱۰۶۱/(ASCE)۰۷۳۳-۹۳۹۹(۱۹۸۸)۱۱۴:۳(۵۳۶).

۲۵. Liu, C.S., and Huang, Z.M., ۲۰۰۴. The steady state responses of sdof viscous elasto-plastic oscillator under sinusoidal loadings. *Journal of Sound and Vibration*, ۲۷۳(۱-۲), pp. ۱۴۹-۱۷۳. doi.org/۱۰,۱۰۱۶/S۰۰۲۲-۴۶۰X(۰۳)۰۰۴۲۳-۱.

۲۶. Kalmar-Nagy, T., and Shekhawat, A., ۲۰۰۹. Nonlinear dynamics of oscillators with bilinear hysteresis and sinusoidal excitation. *Physica D*, ۲۳۸(۱۷), pp. ۱۷۶۸-۱۷۸۶. doi.org/۱۰,۱۰۱۶/j.physd.۲۰۰۹,۰۶,۰۱۶.

۲۷. Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W., and Chung, R.M., ۱۹۹۷. A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, ۲۶(۶), pp. ۶۱۷-۳۵. doi.org/۱۰,۱۰۰۲/(SICI)۱۰۹۶-۹۸۴۵(۱۹۹۷۰۶)۲۶:۶%۳C۶۱۷::AID-EQE۶۴۴%۳E۳,۰.CO;۲-Z.

ویرایش نشده