

# استخراج و ارزیابی پارامتریک توابع پاسخ بسامدی سازه‌های کشسان و ناکشسان تحت تحریک‌های پالسی شکل زمین

سامان باقری\* (دانشیار)

حسین حیاتی‌راد (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۳ (دوره ۴۰، شماره ۴، صص. ۲۶-۱۳)، پژوهشی

در مطالعه‌ی حاضر، پاسخ‌های کشسان و ناکشسان سیستم‌های یک درجه‌ی آزاد تسلیم‌شونده با سخت‌شوندگی تحت پالس‌های ساده‌شده‌ی زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل، به‌صورت توابع پاسخ بسامدی برای جابجایی نسبی و شتاب کل سازه استخراج و ارزیابی شده است. برای شبیه‌سازی حرکت‌های پالس‌گونه‌ی زمین، از مدل ریاضی پالس ماورودیدیس و پاپاجورجیو استفاده شده است. متغیرهای بررسی‌شده در تحلیل پارامتریک، شامل ۶ پارامتر بی‌بعد بوده 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 عبارت‌اند از: تعداد پالس، فاز (شکل) پالس، نسبت میرایی سازه، نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم سازه، نسبت بسامد تحریک (پالس) به سازه، و نسبت دامنه‌ی تحریک (پالس) به مقاومت سازه. نتایج حاصل نشان داده است که علی‌رغم شباهت توابع پاسخ بسامدی جابجایی نسبی و شتاب کل در سازه با رفتار کشسان خطی، خصوصیات دو پاسخ اخیر به هنگام رفتار خمیری کاملاً با هم متفاوت است. همچنین نحوه‌ی تأثیر پارامترهای مختلف سازه و پالس ورودی در پاسخ‌ها به هنگام رفتار خطی و یا غیرخطی متفاوت است.

s\_bagheri@tabrizu.ac.ir

hossein.raad.hayati@tabrizu.ac.ir

واژگان کلیدی: تحریک‌های پالسی‌شکل، زلزله‌های نزدیک گسل، تابع پاسخ بسامدی، جابجایی، شتاب.

## ۱. مقدمه

طی سال‌های گذشته، ماهیت متمایز زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل از زلزله‌های دور از گسل شناخته شده است. بسیاری از زلزله‌های نزدیک گسل، محتوای بسامدی پایین (دوره‌ی تناوب بالا) و همچنین پالس‌های شدید سرعت دارند. توان آسیب‌زایی شدید زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل در سازه‌های مهندسی پس از چند زلزله‌ی قوی و مخرب، از جمله زلزله‌های: نورث‌ریچ (۱۹۹۴)، کوبه (۱۹۹۵)، و چی‌چی (۱۹۹۹) بیش از پیش آشکار شده است.

به‌دلیل ماهیت ضربه‌یی (پالس‌گونه) بیشتر حرکت‌های زمین در حوزه‌های نزدیک گسل، پژوهشگران از مدل‌های ریاضی توابع پالسی‌شکل برای مدل‌سازی محتوای دوره‌ی تناوب بالای آن‌ها استفاده کرده‌اند. استفاده از پالس‌های ساده در ارزیابی پاسخ دینامیکی سازه‌ها، فقط مربوط به بارگذاری لرزه‌یی نمی‌شود و سابقه‌یی

طولانی دارد. به‌عنوان مثال، بیگز<sup>۱</sup> (۱۹۶۴)، از پالس‌های یک‌طرفه در شکل‌های مستطیلی، مثلثی، و شیب‌دار برای ارزیابی پاسخ کشسان و غیرکشسان سیستم‌های تک درجه‌ی آزادی (SDOF)<sup>۲</sup> استفاده کرده است. استفاده از شکل‌های یک‌طرفه به‌دلیل شکل موج‌های غیرواقعی برای حرکت‌های زمین، کاستی‌هایی دارد و آن‌ها بیشتر برای شبیه‌سازی بار ناشی از ضربه و انفجار مناسب هستند.

به‌دلیل ماهیت ضربه‌یی (پالس‌گونه) بیشتر حرکت‌های زمین در حوزه‌های نزدیک گسل، پژوهشگران از مدل‌های ریاضی توابع پالسی‌شکل برای مدل‌سازی محتوای دوره‌ی تناوب بالای آن‌ها استفاده کرده‌اند. استفاده از پالس‌های ساده در ارزیابی پاسخ دینامیکی سازه‌ها، فقط مربوط به بارگذاری لرزه‌یی نمی‌شود و سابقه‌یی

\*نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰، تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۲/۱۲/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳.

استناد به این مقاله:

باقری، سامان و حیاتی‌راد، حسین، ۱۴۰۳. استخراج و ارزیابی پارامتریک توابع پاسخ بسامدی سازه‌های کشسان و ناکشسان تحت تحریک‌های پالسی شکل زمین. مهندسی عمران شریف، ۴۰(۴)، صص. ۲۶-۱۳. DOI:10.24200/J30.2024.63654.3280

<sup>۱</sup> Biggs

<sup>۲</sup> Single Degree Of Freedom

<sup>۳</sup> Mavroeidis & Papageorgiou

واقعی، زلزله‌ی نزدیک گسل واسنجی شده است. علوی و کراوینکلر<sup>۱</sup> (۲۰۰۴)، از سه نوع موج مربعی پالس شتاب، که می‌توانند به صورت خیلی ساده توسط دو پارامتر دوره‌ی تناوب پالس و شدت آن تعریف شوند، در مطالعات‌شان استفاده کرده‌اند. آن‌ها به وجود شباهت بین پاسخ سازه‌های قاب خمشی تحت تحریک‌های زلزله‌های واقعی نزدیک گسل و تحریک‌های پالس گونه اشاره کرده و نشان داده‌اند وقتی که نسبت دوره‌ی تناوب اصلی سازه به دوره‌ی تناوب پالس در محدوده‌ی ۰/۳۷۵ تا ۳ باشد، ویژگی‌های مهم پاسخ به زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل را می‌توان با پالس‌های معادل ساده‌ی آن‌ها نشان داد. هی و آگراوال<sup>۲</sup> (۲۰۰۸)، از کاهندگی زمانی تابع نمایی با توان منفی در کنار تابع هارمونیک برای بیان تحلیلی پالس‌های سرعت مشاهده‌شده در حرکت‌های زمین حوزه‌ی نزدیک گسل استفاده کرده‌اند. در مطالعه‌ی دیگری، مصطفی و تاوکاکی<sup>۳</sup> (۲۰۱۰)، به توسعه‌ی مدل‌های ساده‌ی تعینی (قطعی) و احتمالاتی برای حرکت‌های پالس‌دار زمین در زلزله‌های حوزه‌ی نزدیک گسل پرداخته‌اند. از مدل قطعی می‌توان برای شبیه‌سازی حرکت‌های پالس‌گونه‌ی زمین به‌عنوان ورودی برای تحلیل تاریخچه‌ی 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 استفاده شود.

در نوشتار حاضر، توابع پاسخ بسامدی سیستم‌های تک‌درجه‌ی آزاد خطی (کشسان) و غیرخطی (کشسان-خمیری دوخطی با سخت‌شوندگی پس از تسلیم) تحت پالس تحلیلی ماورویدیس به‌عنوان شبیه‌ساز محتوای دوره‌ی تناوب بالای زلزله‌های نزدیک گسل، استخراج و به‌صورت پارامتریک با تغییر تمام پارامترهای تحریک ورودی و سازه ارزیابی شده‌اند. مطالعه‌ی پارامتریک حاضر، باعث درک فیزیکی بهتر و جامع‌تر از رفتار سیستم‌های خطی و غیرخطی تحت حرکت‌های پالس‌گونه‌ی زمین می‌شود. توابع بسامدی استخراج‌شده، حالت‌هایی که منجر به تشدید یا تضعیف پاسخ‌ها شده است، را نمایان می‌سازند و لذا برای طراحی‌ها بسیار سودمند خواهند بود. همچنین با استفاده از توابع بسامدی مذکور و براساس اهداف طراحی، می‌توان نسبت به انتخاب پارامترهای مناسب و تقریباً بهینه‌ی سیستم‌های کشسان و غیرکشسان تحت حرکت‌های پالس‌گونه اقدام کرد. خصوصیات بارز پژوهش حاضر در مقایسه با کارهای مشابه قبلی را می‌توان در این سه مورد خلاصه کرد:

الف) پاسخ‌ها به‌صورت توابع پاسخ بسامدی بی‌بُعدشده‌ی مناسب بر روی محدوده‌ی بسامدی وسیع ارائه و ارزیابی می‌شوند. لذا، امکان مقایسه‌ی نتایج با آثار دینامیکی انواع بارگذاری‌های دیگر فراهم می‌شود.

ب) اثر تمامی پارامترهای تحریک ورودی پالس‌گونه (شامل ۴ مورد: دامنه، بسامد یا دوره‌ی تناوب، زاویه‌ی فاز، و تعداد) و سازه‌ی ناکشسان دوخطی (شامل ۴ مورد: بسامد یا دوره‌ی تناوب، نسبت میرایی، مقاومت، و نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم) به صورت مجموعاً ۶ متغیر بی‌بُعد در تحلیل‌های پارامتریک ارزیابی می‌شود.

ج) علاوه بر پاسخ جابجایی سازه، پاسخ شتاب کل آن نیز استخراج و ارزیابی می‌شود. در حالی که جابجایی معمولاً معیاری برای خرابی اجزاء سازه‌ی است، شتاب کل نیز معیار خرابی برخی اجزاء غیرسازه‌ی، و همچنین معیار آسایش و ایمنی ساکنان است.

## ۲. مدل ریاضی حرکت‌های پالس‌گونه‌ی زمین

در پژوهش حاضر، برای شبیه‌سازی پالس‌های سرعت مشاهده‌شده در زلزله‌های نزدیک گسل از مدل ریاضی پیشنهادی ماورویدیس و پاپاجورجیو

مطالعه‌ی پاسخ سیستم‌های کشسان و ناکشسان تحت حرکت‌های پالس‌گونه‌ی زمین، از جمله موضوع‌های مهندسی زلزله است، که در سال‌های اخیر مورد توجه برخی از پژوهشگران قرار گرفته است.<sup>۴،۵،۶،۷،۸،۹،۱۰،۱۱،۱۲</sup> استفاده از شکل‌های بسیار ساده برای پالس‌های تحلیلی و یا فرض نامیرا یا خطی بودن سیستم اصلی می‌تواند منجر به حصول فرم بسته‌ی پاسخ شود.<sup>۱۳،۱۴،۱۵،۱۶،۱۷،۱۸،۱۹،۲۰</sup> ولی در هنگام استفاده از پالس‌های تحلیلی دقیق‌تر برای سیستم‌های ناکشسان و میرا، معمولاً انجام تحلیل‌های عددی برای حصول پاسخ الزامی است. در پژوهش حاضر از پالس تحلیلی ماورویدیس و پاپاجورجیو (۲۰۰۳)،<sup>۱۶</sup> که دقت و مقبولیت بالایی برای شبیه‌سازی زلزله‌های نزدیک گسل پالس‌گونه دارد، استفاده شده است؛ لذا در ادامه، به مطالعاتی که از مدل تحلیلی مذکور برای ارزیابی پاسخ سازه‌ها استفاده کرده‌اند، اشاره شده است. همچنین از این به بعد، برای رعایت اختصار، پالس مذکور با عنوان پالس ماورویدیس خطاب شده است. ماورویدیس و همکاران (۲۰۰۴)،<sup>۱۳</sup> پاسخ کشسان سازه‌ی تک‌درجه‌ی آزاد را تحت پالس ماورویدیس در حالت خاص نامیرا به صورت تحلیلی و به فرم طیف پاسخ کشسان ارائه کرده‌اند. ایشان همچنین برای همان سیستم تک‌درجه‌ی آزاد نامیرا با فرض رفتار کشسان-خمیری کامل<sup>۴</sup> (بدون سخت‌شوندگی بعد از تسلیم) پاسخ را به صورت طیف پاسخ ناکشسان تسلیم محاسبه کرده‌اند. الونسو-رودریگز و میراندا<sup>۵</sup> (۲۰۱۵)،<sup>۱۶</sup> یک حل تحلیلی بسته برای پاسخ سازه‌ی تک درجه‌ی آزاد با رفتار کشسان خطی تحت پالس ماورویدیس ارائه و با استفاده از همان حل و براساس مفهوم برهم نهی مودال، پاسخ و رفتار مدل ساده‌ی از ساختمان‌های چندطبقه به صورت تیر طره‌ی خمشی-برشی را ارزیابی کرده‌اند. گو<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۸)،<sup>۱۷</sup> به بررسی اثر مدت دوام<sup>۷</sup> حرکت‌های پالس‌گونه‌ی زمین و شناسایی مناسب‌ترین معیار

<sup>۱</sup> Alonso-Rodriguez & Miranda

<sup>۲</sup> Guo

<sup>۳</sup> Duration effect

<sup>۴</sup> Yang

<sup>۱</sup> Alavi & Krawinkler

<sup>۲</sup> He & Agrawal

<sup>۳</sup> Moustafa & Takewaki

<sup>۴</sup> Elastic-perfectly plastic

در حالت کلی و به ازاء همه‌ی متغیرهای دیگر پالس (مخصوصاً زمانی که  $U \neq 0$  باشد)، دقیقاً برابر دامنه‌ی سرعت نیست؛ در نتیجه،  $\omega_p A \equiv 2\pi f_p A$  نیز برابر بیشینه‌ی مقدار شتاب پالس ورودی نیست. بیان بیشینه‌ی مقادیر سرعت و شتاب تحریک به صورت تحلیلی مشکل است و در هر مورد می‌توان به صورت عددی آن‌ها را محاسبه کرد. در این رابطه، باز قابل

[۶] استفاده شده است. آن‌ها برای بیان ریاضی تاریخچه‌ی زمانی پالس سرعت از موجک گابور<sup>۱</sup> اصلاح شده استفاده کرده‌اند؛ بدین ترتیب که منحنی پوش موجک گابور، که یک تابع نمایی (گوسی<sup>۲</sup>) است، را با یک تابع متقارن زنگوله‌یی شکل دیگر، که بیان تحلیلی ساده‌تری دارد (کسینوسی بالارفته)، جایگزین و تاریخچه‌ی زمانی پالس سرعت و شتاب زمین را به صورت روابط ۱ و ۲ ارائه کرده‌اند:

$$v_g(t) = \begin{cases} \frac{A}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{\gamma \pi f_p}{\gamma} (t-t_0)\right) \right] \cos[2\pi f_p (t-t_0) + \nu], & t_0 - \frac{\gamma}{2f_p} \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2f_p} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$a_g(t) = \begin{cases} -\frac{A\pi f_p}{\gamma} \left[ \sin\left(\frac{\gamma \pi f_p}{\gamma} (t-t_0)\right) \cos[2\pi f_p (t-t_0) + \nu] + \gamma \sin[2\pi f_p (t-t_0) + \nu] \left[ 1 + \cos\left(\frac{\gamma \pi f_p}{\gamma} (t-t_0)\right) \right] \right], & t_0 - \frac{\gamma}{2f_p} \leq t \leq t_0 + \frac{\gamma}{2f_p} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

توجه است که بیشتر مطالعات استفاده کننده از پالس ماوروییدیس همانند برخی منابع، [۱۷، ۱۸] بدون در نظر گرفتن نکته‌ی اخیر، پاسخ‌های محاسباتی خود را بر حسب پارامتر کنترل کننده‌ی دامنه و نه مقدار دقیق دامنه‌ی تحریک بیان و بی‌بُعد کرده‌اند. اگرچه این کار به خودی خود ایراد ندارد؛ ولی در این صورت نتایج حاصل با نتایج به دست آمده از سایر بارگذاری‌های دینامیکی قابل مقایسه نخواهد بود.

در شکل ۱، تاریخچه‌ی زمانی سرعت و شتاب زمین برای پالس ماوروییدیس در حالت متقارن ( $U=0$ ) با پارامترهای  $T_p=1$  s،  $A=100$  cm/s و سه  $\gamma$  مختلف مشاهده می‌شود (شتاب با تقسیم بر  $g$  بر حسب شتاب ثقل زمین محاسبه شده است).

که در آن‌ها،  $A$  نشان دهنده‌ی بزرگی پالس است، که دامنه‌ی پالس را کنترل می‌کند؛  $f_p$  بسامد غالب پالس است (در نتیجه بسامد دورانی پالس  $\omega_p = 2\pi f_p$  و دوره‌ی تناوب پالس  $T_p = 1/f_p$  است)؛  $U$  زاویه‌ی فاز پالس است، که  $U=0$  توصیف کننده‌ی پالس متقارن و  $U = \pm\pi/2$  توصیف کننده‌ی پالس پادمقارن خواهد بود؛  $\gamma$  متغیری است که مشخصه‌ی نوسانی تحریک (تعداد پالس) را تعریف می‌کند ( $\gamma > 1$ )، و  $t_0$  زمان متناظر با اوج پالس است.

با توجه به اینکه در روابط ۱ و ۲، زمان کل تحریک پالسی شکل  $\gamma/f_p$  است، می‌توان مبدأ زمان را لحظه‌ی آغازین تحریک در نظر گرفت (یعنی  $t_0 = \gamma/f_p$ )، و به این ترتیب پارامتر  $t_0$  را از رابطه‌ی پالس ورودی خارج کرد. در این صورت، سرعت و شتاب پالس ورودی به صورت روابط ۳ و ۴ ساده می‌شوند. [۱۶ و ۱۳]

$$v_g(t) = \begin{cases} \frac{A}{2} \left[ 1 - \cos\left(\frac{\gamma \pi f_p}{\gamma} t\right) \right] \cos[2\pi f_p t - \pi\gamma + \nu], & 0 \leq t \leq \frac{\gamma}{f_p} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$a_g(t) = \begin{cases} \frac{A\pi f_p}{\gamma} \left[ \sin\left(\frac{\gamma \pi f_p}{\gamma} t\right) \cos[2\pi f_p t - \pi\gamma + \nu] - \gamma \sin[2\pi f_p t - \pi\gamma + \nu] \left[ 1 - \cos\left(\frac{\gamma \pi f_p}{\gamma} t\right) \right] \right], & 0 \leq t \leq \frac{\gamma}{f_p} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

همچنین باید توجه داشت که اگرچه  $A$  نشان دهنده‌ی بزرگی پالس است، ولی

### ۳. فرمول بندی ابعادی پاسخ‌های کشسان و ناکشسان سیستم تک درجه‌ی آزاد تحت تحریک‌های پایه

سیستم یک درجه‌ی 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 سخت شونده‌گی بعد از تسلیم ( $\alpha$ )، و ضریب میرایی ( $C$ ) است. برای ارتعاش سیستم اخیر در حوزه‌ی کشسان خطی بسامد طبیعی دورانی و نسبت میرایی به ترتیب برابر:  $\omega = \sqrt{k/m}$  و  $\xi = c/2m\omega$  بوده 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 رابطه‌ی ۵ نیز بیان کرد:

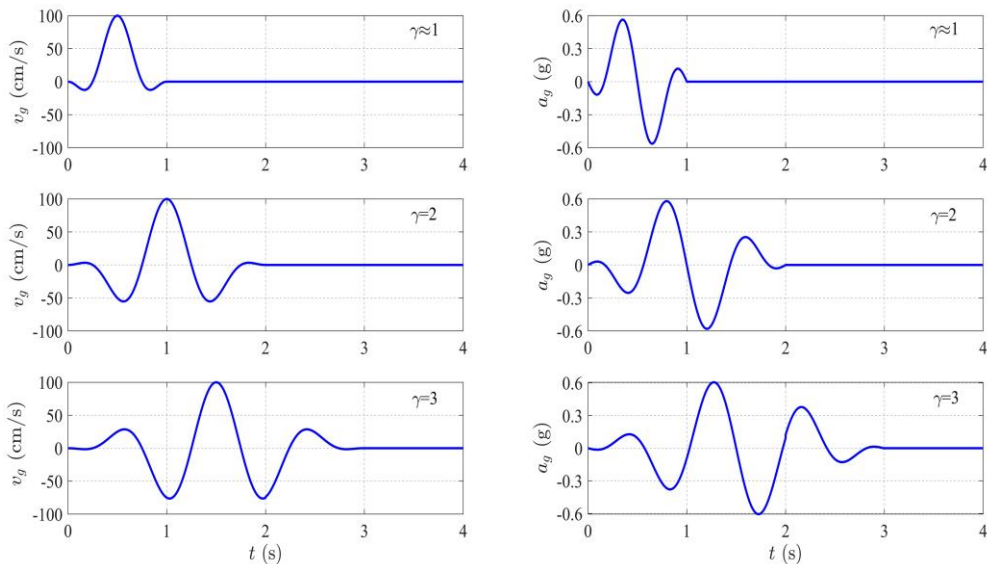
$$a_y = \omega^2 u_y \quad (5)$$

معادله‌ی حرکت سیستم غیرخطی تحت تحریک پایه‌ی زمین به صورت رابطه‌ی ۶ است:

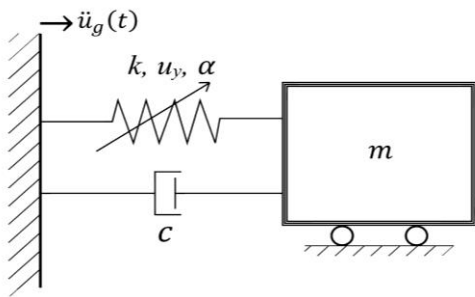
$$\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + \frac{f_s(u)}{m} = -\ddot{u}_g(t) \quad (6)$$

<sup>۲</sup> Gaussian

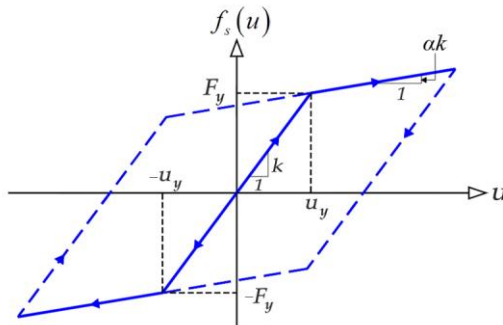
<sup>۱</sup> Gabor



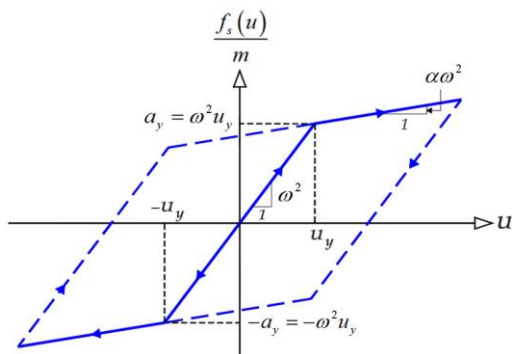
شکل ۱. تاریخچه‌ی زمانی سرعت و شتاب پالس ماورودیدیس با  $T_p = 1$  s،  $A = 100$  cm/s،  $v = 0$ ، و سه  $\gamma$  مختلف.



شکل ۲. سیستم یک درجه‌ی آزاد تحت تحریک پایه.



شکل ۳. رابطه‌ی نیرو-جابجایی سیستم یک درجه‌ی آزاد غیرخطی.



شکل ۴. رابطه‌ی نیروی جرم واحد-جابجایی سیستم یک درجه‌ی آزاد غیرخطی.

که در آن،  $\ddot{u}_g(t)$  شتاب زمین است 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  $ku$ ، و در سازه با رفتار کشسان-خمیری (دوخطی) یک تابع چند ضابطه‌یی مطابق شکل ۳ است.

چون در معادله‌ی حرکت (رابطه‌ی ۶)، تابع  $f_s(u)$  با تقسیم بر جرم ظاهر می‌شود، بهتر است با تقسیم کمیت محور قائم در شکل ۳ بر جرم، رابطه‌ی نیروی جرم واحد در برابر جابجایی استخراج شود، که این کار در شکل ۴ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن و معادله‌ی حرکت نتیجه می‌شود که برای هر تحریک پایه‌ی مفروض  $\ddot{u}_g(t)$ ، پاسخ دینامیکی  $u(t)$  سازه‌ی غیرخطی مدنظر ذکرشده فقط به ۴ پارامتر  $\alpha$ ،  $\omega$ ،  $\alpha$ ، و  $u_y$  بستگی دارد. با توجه به رابطه‌ی ۵، چهار پارامتر اخیر را می‌توان به صورت  $\alpha$ ،  $\omega$ ،  $\alpha$ ، و  $a_y$  نیز در نظر گرفت.

تحریک دینامیکی مفروض  $\ddot{u}_g(t)$  در یکی از ساده‌ترین حالت‌های خود می‌تواند هارمونیک باشد، که فقط دو مشخصه‌ی  $\ddot{u}_g$  (دامنه) و  $\bar{\omega}$  (بسامد) را خواهد داشت (یعنی  $\ddot{u}_g(t) = \ddot{u}_g \cdot \sin \bar{\omega}t$ ). می‌توان دو پارامتر دامنه و بسامد تحریک را در قیاس با مقاومت و بسامد طبیعی سازه به صورت پارامترهای بی‌بعد به صورت رابطه‌های ۷ و ۸ تعریف کرد:

$$\bar{a} = \frac{\ddot{u}_g}{a_y} = \frac{\ddot{u}_g}{\omega^2 u_y} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\bar{\omega}}{\omega} \quad (8)$$

که در آن‌ها،  $\bar{a}$  نسبت دامنه‌ی (بیشینه) شتاب تحریک به شتاب تسلیم سازه یا به عبارتی نسبت اندازه‌ی نیروی معادل وارده به مقاومت تسلیم سازه و  $\beta$  نیز نسبت بسامد غالب تحریک به بسامد طبیعی سازه هستند. بنابراین پاسخ بی‌بعدشده‌ی سازه‌ی غیرخطی تحت تحریک هارمونیک با دو مشخصه‌ی دامنه

و بسامد را می‌توان فقط براساس چهار پارامتر بی‌بعد  $\xi$ ،  $\alpha$ ،  $\bar{a}$ ، و  $\beta$  بیان کرد.

در حالتی که تحریک مفروض  $\ddot{u}_g(t)$ ، به صورت شتاب پالس تحلیلی ماورودیس باشد، یعنی  $a_g(t)$  در رابطه ۴، علاوه بر دو مشخصه دامنه و بسامد غالب، دو مشخصه  $\gamma$  و  $U$  را هم خواهد داشت. در این حالت،  $\bar{\omega}$  همان بسامد غالب پالس ( $\omega_p$ ) است و  $\ddot{u}_g$  نیز بیشینه مقدار رابطه ۴ است، که بر حسب  $A$ ،  $\omega_p$ ،  $U$ ، و  $\gamma$  حاصل می‌شود. بنابراین پاسخ بی‌بعدشده‌ی سازه با رفتار کشسان-خمیری دوخطی تحت پالس تحلیلی ماورودیس تابعی از ۶ پارامتر بی‌بعد خواهد بود: دو پارامتر خصوصیات سازه ( $\xi$  و  $\alpha$ )، دو پارامتر نسبت تحریک به سازه ( $\bar{a}$  و  $\beta$ )، و دو پارامتر بیان‌کننده‌ی فرم تحریک پالسی ( $\gamma$  و  $U$ ). در حالتی که سازه با رفتار کشسان خطی فرض شود،  $\alpha$  حذف می‌شود؛ همچنین  $\bar{a} = 0$  بوده و این پارامتر نیز از فهرست پارامترهای تعیین‌کننده‌ی پاسخ حذف می‌شود. این تذکر لازم است که برای هر نوع تحریک دینامیکی دیگر نیز اگر بتوان تابع زمانی تحریک را بر حسب بسامد غالب، بیشینه‌ی اندازه، و یک‌سری پارامترهای بی‌بعد دیگر بیان کرد، می‌توان پارامترهای تأثیرگذار در پاسخ بی‌بعدشده‌ی سازه‌ی غیرخطی را مشابه تحلیل فوق نتیجه گرفت.

پاسخ‌های سازه‌ی مدنظر در پژوهش حاضر، شامل بیشینه‌ی جابجایی نسبی سازه نسبت به زمین ( $u_{max}$ ) و بیشینه‌ی شتاب کل سازه ( $\ddot{u}'_{max}$ ) است. کمیت اول، معمولاً در ارزیابی خرابی اجزاء سازه‌ی و کمیت دوم، نیز در ارزیابی خرابی برخی اجزاء غیرسازه‌ی و همچنین تأمین آسایش ساکنان مهم هستند. کمیت دوم را به راحتی می‌توان بر حسب بیشینه‌ی اندازه‌ی (دامنه) شتاب تحریک ورودی یعنی  $\ddot{u}_g$  بی‌بعد کرد. اگر لازم باشد کمیت اول نیز بر حسب پارامتری که در برگیرنده‌ی دامنه‌ی شتاب ورودی  $\ddot{u}_g$  باشد، بی‌بعد شود، با توجه به اینکه جابجایی استاتیکی ( $\delta_{st}$ ) برابر با دامنه‌ی نیروی معادل وارده تقسیم بر سختی سازه است، در اینجا به شکل  $\delta_{st} = \ddot{u}_g / \omega^2$  در می‌آید، و می‌توان از  $\delta_{st}$  برای این منظور استفاده کرد (رابطه‌های ۹ و ۱۰):

$$r_d = \frac{u_{max}}{\delta_{st}} = \frac{u_{max}}{\ddot{u}_g / \omega^2} \quad (9)$$

$$r_a = \frac{\ddot{u}'_{max}}{\ddot{u}_g} \quad (10)$$

که در آن‌ها،  $r_d$  و  $r_a$  به ترتیب پاسخ‌های جابجایی نسبی و شتاب کل بی‌بعدشده (نسبت پاسخ‌های جابجایی نسبی و شتاب کل) هستند.

هر یک از پاسخ‌های بی‌بعدشده را می‌توان به صورت تابعی از  $\beta$  به ازاء مقادیر مفروض سایر پارامترها بیان کرد، که آن را اصطلاحاً تابع پاسخ بسامدی (FRF)<sup>۱</sup> و منحنی حاصل را منحنی پاسخ بسامدی گویند. همچنین با توجه به نحوه‌ی بی‌بعدکردن پاسخ‌ها، که بر حسب اندازه‌ی تحریک ورودی ( $\ddot{u}_g$ )

است، هر کدام از دو تابع پاسخ بسامدی جابجایی و شتاب در این حالت در واقع اندازه‌ی تابع انتقال (TF)<sup>۲</sup> برای جابجایی و شتاب هم خواهند بود.

در بارگذاری هارمونیک، تابع پاسخ بسامدی جابجایی بی‌بعدشده‌ی سازه در حالت مانا را ضریب بزرگ‌نمایی دینامیکی (DMF) نیز می‌نامند. برای سازه‌ی تک‌درجه‌ی آزاد با رفتار کشسان خطی تحت بارگذاری هارمونیک، ضریب بزرگ‌نمایی دینامیکی و ضریب انتقال شتاب کل در مراجع دینامیک سازه‌ها<sup>[۲۱ و ۲۲]</sup> طبق روابط ۱۱ و ۱۲ ارائه و ارزیابی شده‌اند. ضرایب مذکور در سازه با رفتار کشسان-خمیری نیز می‌توانند با روش‌های تحلیلی تقریبی و یا روش‌های عددی ارزیابی شوند.<sup>[۲۳ و ۲۴]</sup> توابع پاسخ بسامدی جابجایی و شتاب کل سازه تحت حرکت پالس‌گونه‌ی زمین، که در پژوهش حاضر با تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی به دست آمده‌اند، در حالت رفتار خطی سازه قابل مقایسه با نتایج متناظر در بارگذاری هارمونیک مطابق روابط ۱۱ و ۱۲ خواهند بود.

$$r_d^{steady} = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \quad (11)$$

$$r_a^{steady} = \frac{\sqrt{1+(2\xi\beta)^2}}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \quad (12)$$

همچنین لازم است که در مورد پارامتر بی‌بعد  $\bar{a}$ ، که مطابق رابطه‌ی ۷ تعریف شده است، توضیح بیشتری ارائه شود. مشاهده شد که  $\bar{a}$  به صورت نسبت بیشینه‌ی شتاب تحریک زمین به شتاب تسلیم سازه و یا به عبارتی، به صورت بیشینه‌ی اندازه‌ی نیروی مؤثر زلزله به مقاومت تسلیم سازه تعریف شده است ( $\bar{a} = \ddot{u}'_{max} / a_y \equiv m \ddot{u}'_{max} / m a_y = P_{eff} / F_y$ ) 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 حالی که 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 محدوده‌ی  $0 < \bar{a} < 1$  نیز به خاطر آثار بزرگ‌نمایی دینامیکی ممکن است بروز رفتار غیرخطی در برخی بسامدهای تحریک نسبی ( $\beta$ ) مشاهده شود. برای تشخیص اینکه آیا در یک بارگذاری با بسامد تحریک مشخص، ورود به ناحیه‌ی ناکشسان و رفتار غیرخطی اتفاق افتاده است، می‌توان از مقایسه‌ی بیشینه‌ی مقدار جابجایی با جابجایی تسلیم استفاده کرد. نسبت دو مورد اخیر، با عنوان معروف ضریب شکل‌پذیری نیاز ( $\mu$ ) طبق رابطه‌ی ۱۳ می‌تواند برای این موضوع استفاده شود:

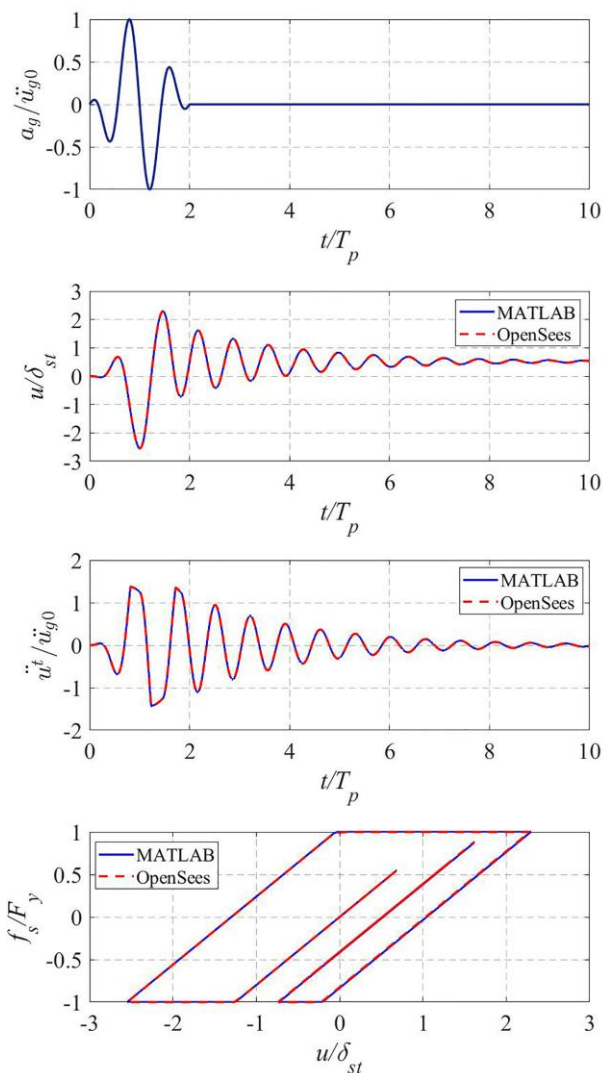
$$\mu = \frac{u_{max}}{u_y} \quad (13)$$

با توجه به تعریف اخیر و همچنین روابط ۷ و ۹، می‌توان  $\mu$  را به شکل رابطه‌ی ۱۴ نیز نتیجه گرفت:

<sup>۲</sup> Dynamic Magnification Factor

<sup>۱</sup> Frequency Response Function

<sup>۲</sup> Transfer Function



شکل ۵. نتایج تحلیل تاریخی زمانی غیرخطی برای سازه‌ی تک‌درجه‌ی آزاد تحت پالس ماوروییدیس با پارامترهای بی‌بعد:  $\alpha = 0$ ،  $\xi = 0.05$ ،  $\beta = 0.7$ ،  $\bar{a} = 0.8$ ،  $v = 0$ ،  $\gamma = 2$

#### ۴. ارزیابی پارامتریک توابع پاسخ بسامدی سیستم تک‌درجه‌ی آزاد تحت پالس ماوروییدیس

##### ۱.۴. ارزیابی کلی و بررسی اثر تراز دامنه‌ی نسبی پالس

در بخش حاضر، برای انجام ارزیابی کلی از پاسخ‌ها و همچنین بررسی تأثیر پارامتر نسبت دامنه‌ی پالس، مقادیر  $\bar{a}$  برابر با ۰، ۰.۲، ۰.۵، ۰.۸، ۱، و ۱.۰۵ در نظر گرفته شده است، که مقدار اول یعنی صفر به معنی و متناظر با رفتار کشسان خطی سیستم در کلیه‌ی بسامدهای تحریک است. همچنین برای پارامتر تعداد پالس ( $\gamma$ )، سه مقدار ۱، ۲، و ۳ فرض شده است. سایر پارامترهای پالس و سازه در این قسمت ثابت هستند، یعنی زاویه‌ی فاز پالس  $v = 0$  (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 شده است.

نتایج عددی حاصل به‌صورت توابع پاسخ بسامدی برای نسبت جابجایی ( $r_d$ )

$$\mu = r_d \cdot \bar{a} \quad (14)$$

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  $\bar{a} > 1$  منجر به پاسخ بی‌کران سازه می‌شود؛ ولی در سازه‌ی کشسان-خمیری با سخت‌شوندگی بعد از تسلیم، حالت  $\bar{a} > 1$  می‌تواند با بروز جابجایی‌های بزرگ تحمل شود. به این موضوع نیز بعداً در ارزیابی پاسخ‌های عددی حاصل در پژوهش حاضر توجه شده است.

در انتهای بخش کنونی، یک نمونه از نتایج عددی تحلیل تاریخی زمانی غیرخطی سیستم تک‌درجه‌ی آزاد مد نظر تحت پالس ماوروییدیس با پارامترهای بی‌بعد انتخابی ارائه شده است. برای حل عددی معادله‌های حرکت، از روش بتای نیومارک در حالت شتاب خطی با کدنویسی در محیط متلب استفاده شده است. در بخش بعد، نیز با تغییر تمامی پارامترهای بی‌بعد در محدوده‌های کاربردی، نتایج تحلیل‌های پارامتریک ارائه و ارزیابی شده است. در اینجا دو مشخصه‌ی بی‌بعد سازه، شامل نسبت میرایی و نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم به‌صورت  $\xi = 0.05$  و  $\alpha = 0$  در نظر گرفته شده است. دو مشخصه‌ی بی‌بعد فرم پالس ماوروییدیس نیز شامل تعداد پالس و زاویه‌ی فاز آن به‌صورت  $\gamma = 2$  و  $v = 0$  (معادل با پالس سرعت متقارن) فرض شده است. برای پارامترهای نسبی تحریک به سازه نیز  $\beta = 0.7$  و  $\bar{a} = 0.8$  انتخاب شده‌اند.

نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی براساس پارامترهای بی‌بعد به‌صورت ۴ نمودار در شکل ۵ مشاهده می‌شوند. برای راستی‌آزمایی روش حل عددی، نتایج حاصل از نرم‌افزار OpenSees نیز در شکل ۵ ارائه شده است. در نمودار اول شکل مذکور، تاریخی زمانی شتاب پالس ورودی که براساس پیشینه‌ی اندازه‌ی آن نرمال شده است، به‌صورت تابعی از زمان نرمال‌شده ( $t/T_p$ ) مشاهده می‌شود. در نظر گرفتن مقادیر صفر در انتهای پالس به‌منظور اخذ خروجی در فاز بعد از اعمال پالس تحریک، به‌صورت ارتعاش آزاد میرا بوده است. در دو نمودار بعد، تاریخی زمانی جابجایی نرمال‌شده و شتاب کل نرمال‌شده ارائه شده‌اند. پیشینه‌ی مقادیر (اوج زمانی) این دو نسبت پاسخ، همان  $r_a$  و  $r_d$  است، که به ترتیب ۲/۵۵ و ۱/۴۴ استخراج شده‌اند. ارتعاش آزاد میرا در فاز پاسخ بعد از تحریک پالسی شکل کاملاً قابل مشاهده است. همچنین به دلیل ورود به ناحیه‌ی رفتار ناکشسان (خمیری)، تغییر شکل ماندگار<sup>۱</sup> به اندازه‌ی ۰/۵۲ برابر  $\delta_{st}$  در سازه اتفاق افتاده است، که در فاز ارتعاش آزاد، جابجایی سازه حول این مقدار نوسان کرده است. در نمودار آخر، نیز منحنی هیستریزس نیرو-جابجایی نرمال‌شده‌ی سازه ارائه شده است، که وقوع دو بار تسلیم در جابجایی منفی و یکبار تسلیم در جابجایی مثبت و همچنین ایجاد تغییر شکل ماندگار در انتها قابل مشاهده است.

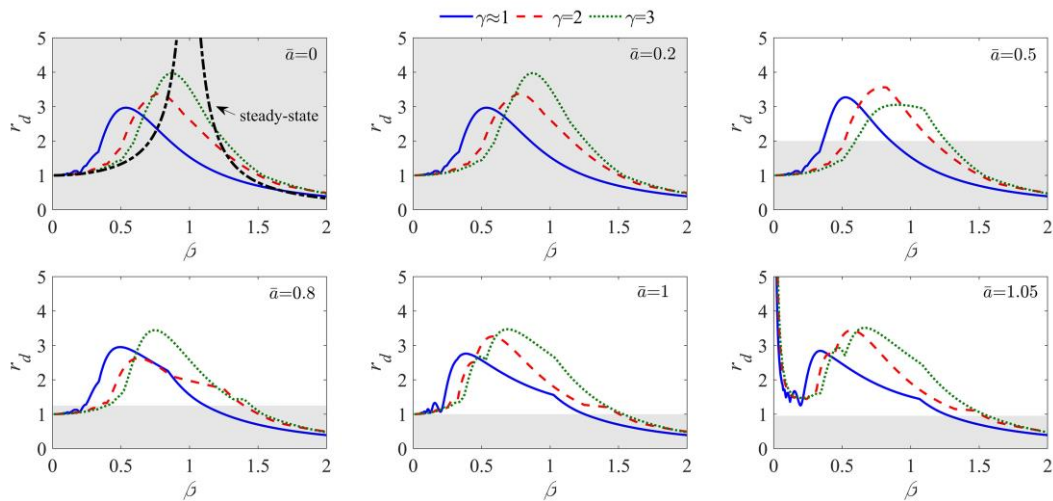
در انتها قابل ذکر است علی‌رغم اینکه در مثال کنونی،  $\bar{a} = 0.8 < 1$  است، یعنی پیشینه‌ی اندازه‌ی شتاب ورودی کمتر از شتاب تسلیم سازه بوده است، آثار دینامیکی بار وارده باعث بروز رفتار غیرخطی شده است. در همین مثال، با تغییر  $\beta$  به مقادیر خیلی کوچک‌تر یا بزرگ‌تر و با حفظ مقادیر سایر پارامترها، رفتار خطی کشسان سازه مشاهده شده است.

<sup>۱</sup> Permanent deformation

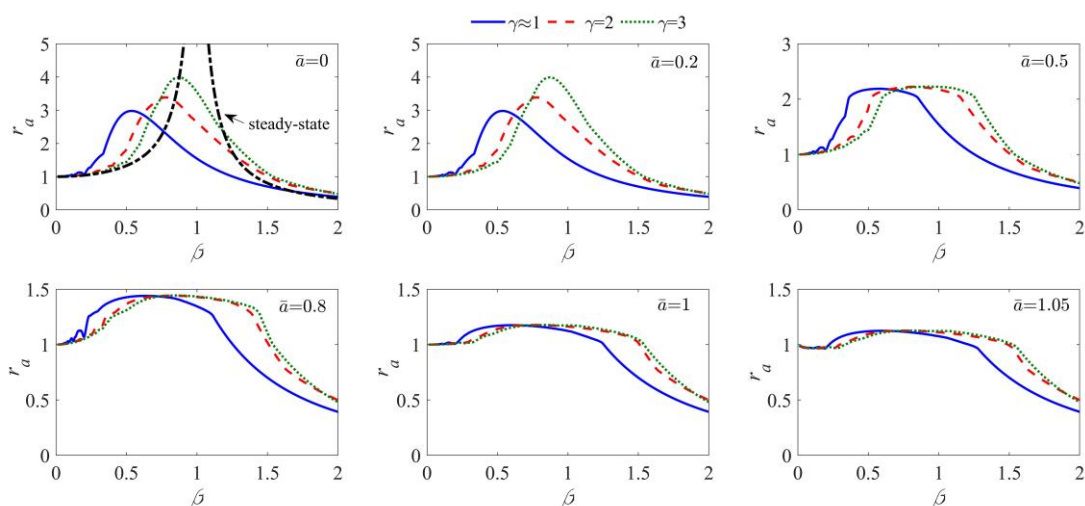
سخت‌شوندگی بعد از تسلیم فرض شده باشد، بیکران شدن جابجایی اتفاق نمی‌افتد، هر چند مقادیر جابجایی بسیار بزرگ حاصل می‌شود. مشابه پدیده‌ی مذکور در ارزیابی پاسخ بسامدی حالت مانای سیستم کشسان-خمیری تحت بارگذاری هارمونیک نیز مشاهده شده است.<sup>[۲۴]</sup>

پدیده‌ی قابل توجه دیگر در منحنی‌های پاسخ بسامدی جابجایی، وجود اغتشاش‌ها، و قله‌های موضعی در قسمت آغازین منحنی‌هاست. قله‌های موضعی در نواحی مذکور با افزایش پارامتر  $\bar{a}$  و در نتیجه افزایش تراز رفتار غیرخطی افزوده شده‌اند. قبلاً مشابه این پدیده در پاسخ بسامدی حالت مانای سازه‌ی تسلیم‌شونده تحت بارگذاری هارمونیک به صورت اثر تشدیدهای فوق‌هارمونیک<sup>۱</sup> گزارش و تحلیل شده است.<sup>[۲۶-۲۴]</sup> در اینجا به دلیل ماهیت متفاوت پاسخ بیشینه‌ی 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 بسامدهای مؤثر جدید برای سازه، باعث

نسبت شتاب کل  $(r_a)$ ، و شکل‌پذیری نیاز  $(\mu)$  در شکل‌های ۶ الی ۸ مشاهده می‌شوند.  $\mu \leq 1$  حاکی از پاسخ سازه در محدوده‌ی رفتار خطی و  $\mu > 1$  نشان‌دهنده‌ی ورود به حوزه‌ی رفتار ناکشسان است. مشاهده می‌شود برای کلیه‌ی حالت‌های  $\bar{a} \leq 1$ ، نقطه‌ی آغازین پاسخ‌های بسامدی نسبت جابجایی و نسبت شتاب کل برابر با ۱ است؛ یعنی وقتی  $\beta$  به سمت صفر میل می‌کند، که به معنی بارگذاری استاتیکی و یا سازه‌ی صلب است، مسلماً بیشینه‌ی جابجایی سازه همان جابجایی استاتیکی و بیشینه‌ی شتاب کل سازه نیز برابر دامنه‌ی شتاب وارده خواهد بود. سپس روند کلی توابع بسامدی، صعودی است و بعد از قله‌ی بی در  $\beta$ ‌های میانی، دوباره با افزایش  $\beta$  نزول می‌کند و حتی در  $\beta$ ‌های بزرگ به کمتر از ۱ هم می‌رسند. در حالت  $\bar{a} > 1$  برای سیستم کشسان-خمیری کامل ( $\alpha = 0$ ) که در این قسمت فرض شده است، زمانی که نسبت بسامد تحریک  $\beta$  به صفر میل می‌کند،  $r_d$  به سمت بی‌کران شدن می‌رود. زیرا بر سازه‌ی کشسان-خمیری کامل با مقاومت تسلیم مشخص نمی‌توان بار استاتیکی بیش از مقاومت آن وارد کرد. در حالی که اگر

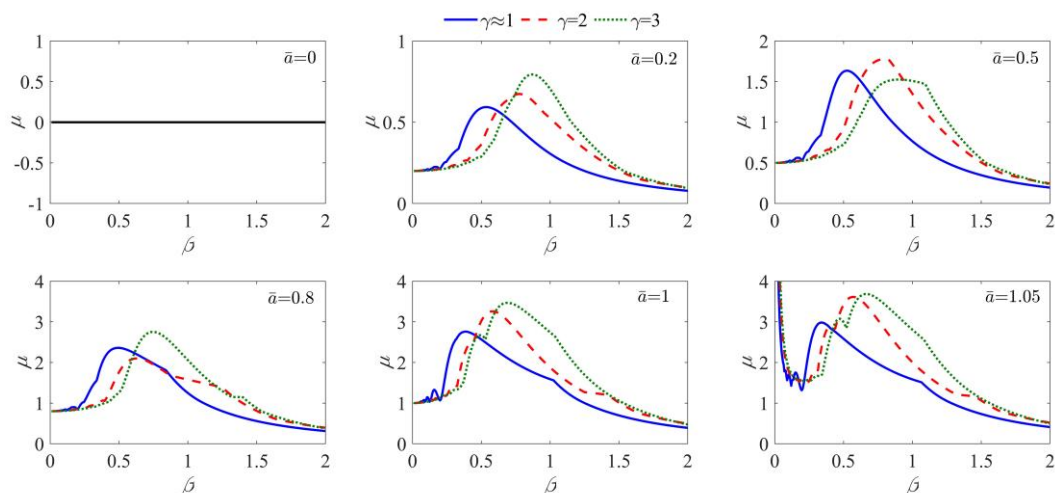


شکل ۶. منحنی‌های پاسخ بسامدی برای نسبت جابجایی سازه‌ی تک درجه‌ی آزاد با رفتار کشسان-خمیری کامل ( $\alpha = 0$ ) و میرایی  $\xi = 0.05$  تحت پالس ماوروییدیس با شکل متقارن ( $\xi = 0.5$ ) و تعداد پالس  $\gamma$  و نسبت دامنه‌ی پالس  $\bar{a}$  مختلف.



شکل ۷. منحنی‌های پاسخ بسامدی برای نسبت شتاب کل سازه تک درجه‌ی آزاد با رفتار کشسان-خمیری کامل ( $\alpha = 0$ ) و میرایی  $\xi = 0.05$  تحت پالس ماوروییدیس با شکل متقارن ( $\xi = 0$ ) و تعداد پالس  $\gamma$  و نسبت دامنه‌ی پالس  $\bar{a}$  مختلف.

<sup>۱</sup> Ultra-harmonic resonances



شکل ۸. منحنی‌های پاسخ بسامدی برای ضریب شکل‌پذیری نیاز سازه‌ی تک درجه‌ی آزاد با رفتار کشسان-خمیری کامل ( $\alpha = 0$ ) و میرایی  $\xi = 0.05$  تحت پالس ماورودیس با شکل متقارن ( $\xi = 0.05$ ) و تعداد پالس  $\gamma$  و نسبت دامنه‌ی پالس  $\bar{a}$  مختلف.

اگرچه ارائه‌ی منحنی‌های  $\mu$  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 حوزه‌ی رفتار غیرخطی و پاسخ ناکشسان باشد (که با مقایسه‌ی مقدار  $\mu$  با عدد ۱ انجام می‌شود)، می‌توان این تشخیص را از روی منحنی‌های  $r_d$  نیز انجام داد. به این ترتیب که با توجه به رابطه‌ی ۱۴، مقایسه‌ی  $\mu$  با ۱، معادل مقایسه‌ی  $r_d$  با  $1/\bar{a}$  است؛ لذا در هر یک از نمودارهای شکل ۶، که برای  $\bar{a}$  مشخص رسم شده است، اگر منحنی‌های پاسخ بسامدی در ناحیه‌ی خاکستری شده واقع می‌شوند، به معنی رفتار خطی سازه و در غیر این صورت، به معنی ورود به حوزه‌ی خمیری و بروز پاسخ غیرخطی سیستم است. در بخش‌های بعدی ارزیابی پارامتریک نیز از شیوه‌ی اخیر برای نشان‌دادن نوع پاسخ خطی یا غیرخطی سازه استفاده شده است.

با افزایش  $\bar{a}$  و بروز رفتار غیرخطی شدیدتر، همواره کاهش  $r_a$  و در نتیجه، کاهش شتاب کل انتقالی به سازه مشاهده می‌شود؛ به طوری که برای تعداد پالس  $\gamma = 2$ ، قله‌ی  $r_a$  از ۳/۳۹ در رفتار خطی به مقادیر ۲/۲۲، ۱/۴۴، ۱/۱۸، و ۱/۱۳ با افزایش  $\bar{a}$  تغییر می‌کند. این در حالی است که  $r_d$  و در نتیجه جابجایی سازه با افزایش رفتار غیرخطی سازه می‌تواند کاسته یا افزوده شود. به طوریکه مشاهده می‌شود، برای تعداد پالس  $\gamma = 2$ ، قله‌ی  $r_d$  از ۳/۳۷ در پاسخ خطی متناظر با  $\bar{a} = 0$  (و نیز  $\bar{a} = 0/2$ ) به ۳/۵۶ در  $\bar{a} = 0/5$ ، به ۲/۶۲ در  $\bar{a} = 0/8$  و به ۳/۲۶ در  $\bar{a} = 1$  تغییر یافته است.

#### ۲.۴. بررسی اثر تعداد پالس

در شکل‌های ۶ الی ۸، پارامتر تعداد پالس  $\gamma$  نیز در محدوده‌ی متداول برای پالس ماورودیس یعنی ۱ تا ۳ متغیر است. شکل‌های مذکور نشان می‌دهند که در حالت سازه با رفتار خطی (یعنی  $\bar{a} = 0$ ) با افزایش  $\gamma$ ، مقادیر بیشینه‌ی (قله‌های) منحنی‌های بسامدی  $r_a$  و  $r_d$  بالاتر می‌روند، به طوری که بیشینه‌ی  $r_d$  از ۲/۹۷ به ۳/۹۷ و بیشینه‌ی  $r_a$  از ۲/۹۸ به ۳/۹۹ می‌رسد، که بیانگر رشد ۳۴٪ است. همچنین موقعیت قله‌ها نیز از چپ به راست منتقل می‌شود. با ملاحظه‌ی مجدد پاسخ حالت مانا تحت تحریک هارمونیک، توجه چنین رفتاری به این صورت است که با افزایش پارامتر تعداد پالس، چرخه‌های بارگذاری و ماندگاری تحریک بیشتر می‌شود و در نتیجه پاسخ نیز شباهت

تشدیدهای موضعی شود. همچنین برخی اغتشاش‌های منحنی‌ها در همین نواحی علی‌رغم رفتار خطی سازه را می‌توان به این موضوع ارتباط داد، که تحریک زمین در پژوهش حاضر به دلیل ماهیت پالسی گذرای خود، به صورت تک‌بسامدی مانا نیست (هر چند بسامد غالب برای آن توصیف شده است). همچنین برخی شکستگی‌ها نیز که در نواحی مختلف پاسخ‌های بسامدی مشاهده می‌شوند، که با ارزیابی پاسخ‌های زمانی معلوم شد و عمدتاً مربوط به شیفت (انتقال) بیشینه‌ی اندازه‌ی پاسخ از مقادیر مثبت به منفی یا برعکس بوده‌اند.

در حالت سازه با رفتار کشسان خطی یعنی  $\bar{a} = 0$ ، پاسخ‌های حالت مانای تحت بارگذاری هارمونیک نیز از روابط ۱۱ و ۱۲ به شکل‌های ۶ و ۷ اضافه شده است. در این حالت، پاسخ‌های بسامدی نسبت جابجایی و نسبت شتاب کل به ترتیب قله‌هایی به اندازه‌ی ۱۰/۰۱ و ۱۰/۰۶ دارند (که برای رؤیت بهتر نتایج تحریک‌های پالسی، از چارچوب تنظیم‌شده‌ی نمودارها بیرون هستند)؛ در حالی که در بارگذاری‌های پالسی به حدود ۳ الی ۴ کاهش یافته‌اند. زمان کوتاه بارگذاری پالسی در مقایسه با ماندگاری بارگذاری هارمونیک با دامنه‌ی ثابت باعث این کاهش شده است. البته باید توجه داشت که پاسخ حالت مانای بارگذاری هارمونیک به دلیل دربرنگرفتن قسمت گذرا، به صورت بیشینه‌ی پاسخ حاصل از بارگذاری هارمونیک نیست. تغییر از بارگذاری هارمونیک به پالسی، همچنین باعث شیفت موقعیت قله‌های پاسخ‌های بسامدی به سمت چپ (یعنی بسامدهای تحریک پایین) می‌شود.

با افزایش  $\bar{a}$ ، امکان و شدت رفتار غیرخطی در سازه افزوده می‌شود. ارزیابی دقیق این موضوع از مشاهده‌ی پارامتر پاسخ  $\mu$  در شکل ۸ حاصل می‌شود. مثلاً ملاحظه می‌شود که به ازاء  $\bar{a} = 0/2$ ، مقادیر شکل‌پذیری نیاز  $\mu$  در کلیه‌ی بسامدهای تحریک نسبی  $\beta$  همچنان زیر ۱ است، که به معنی پاسخ کشسان خطی سازه در کلیه‌ی بارگذاری‌های مذکور است. در نتیجه، منحنی‌های  $r_a$  و  $r_d$  حاصل در شکل‌های ۶ و ۷ برای  $\bar{a} = 0/2$  عیناً تکرار منحنی‌های  $\bar{a} = 0$  هستند. در حالی که برای  $\bar{a} = 0/5$ ، در محدوده‌ی میانی  $\beta$ ،  $\mu$  بزرگ‌تر از ۱ و پاسخ خمیری حاصل شده است. در  $\bar{a} = 0/8$ ، این محدوده‌ی بسامدی میانی، گسترده‌تر شده و در  $\bar{a} = 1$  و  $\bar{a} = 1/05$ ، به‌غیر از یک قسمت انتهایی، بروز پاسخ ناکشسان خمیری در بسامدهای تحریک مختلف مشاهده می‌شود.



نتایج حاصل برای پاسخ‌های بسامدی نسبت جابجایی و نسبت شتاب کل در شکل ۹ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، در سازه با رفتار کشسان خطی ( $\bar{a}=0$ )، تغییر زاویه‌ی فاز پالس باعث تغییرات بسیار اندک در منحنی‌های  $r_d$  و  $r_a$  شده است، به طوری که از بین مقادیر اوج (قله‌های)  $r_d$  در  $U=0$  و  $U=3/37$  در  $U=0$  بوده است. برای  $r_a$  نیز با همین روند بیشترین و کمترین قله به ترتیب  $3/39$  و  $3/13$  بوده است. با بروز رفتار غیرخطی در  $\bar{a}=0/5$  و  $\bar{a}=1$ ، تأثیر  $U$  در منحنی  $r_a$  همچنان چشمگیر نیست، ولی در مورد  $r_d$  در سطوح رفتار غیرخطی مختلف باعث بروز تغییرات متفاوت شده است؛ به طوری که در  $\bar{a}=0/5$ ، پالس متقارن بیشترین پاسخ را ایجاد کرده است؛ ولی در  $\bar{a}=1$  پالس پادمتقارن منجر به بدترین اثر شده است.

#### ۴.۴. بررسی اثر نسبت میرایی سازه

برای بررسی اثر نسبت میرایی سازه در توابع پاسخ بسامدی جابجایی و شتاب کل، سه مقدار  $\xi = 0, 0/2, 0/5$  در نظر گرفته شده است. مقادیر میرایی کوچک متناظر با وضعیت سازه‌های معمول بوده و تأثیر مقادیر بزرگ میرایی در اینجا بررسی نشده است. مشخصات پالس ورودی  $U=0$  و  $\gamma=2$  و سازه همچنان با رفتار کشسان-خمیری کامل ( $\alpha=0$ ) بوده است. باز هم سه حالت  $1, 0/5, 0$  برای مشاهده‌ی رفتار خطی و غیرخطی با شدت‌های مختلف در نظر گرفته شده است.

نتایج حاصل برای پاسخ‌های بسامدی  $r_d$  و  $r_a$  در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، در دو منتهی‌الیه نمودارها ( $\beta$  های کوچک و بزرگ)، منحنی‌های مربوط به میرایی‌های مختلف تا حد زیادی بر هم منطبق هستند، در حالی که در مقادیر میانی  $\beta$ ، میرایی سازه در پاسخ‌های حاصل تأثیر مشهودی دارد. این نتایج عددی را می‌توان به این صورت توجیه کرد:

در  $\beta$  های خیلی بزرگ، زمان دوام بارگذاری پالسی نسبت به زمان تناوب طبیعی سازه اندک بوده و خصوصیات بارگذاری ضربه‌یی حاکم شده است؛ که مشخص است در این حالت، میرایی تأثیر چندانی در پاسخ اوج سازه

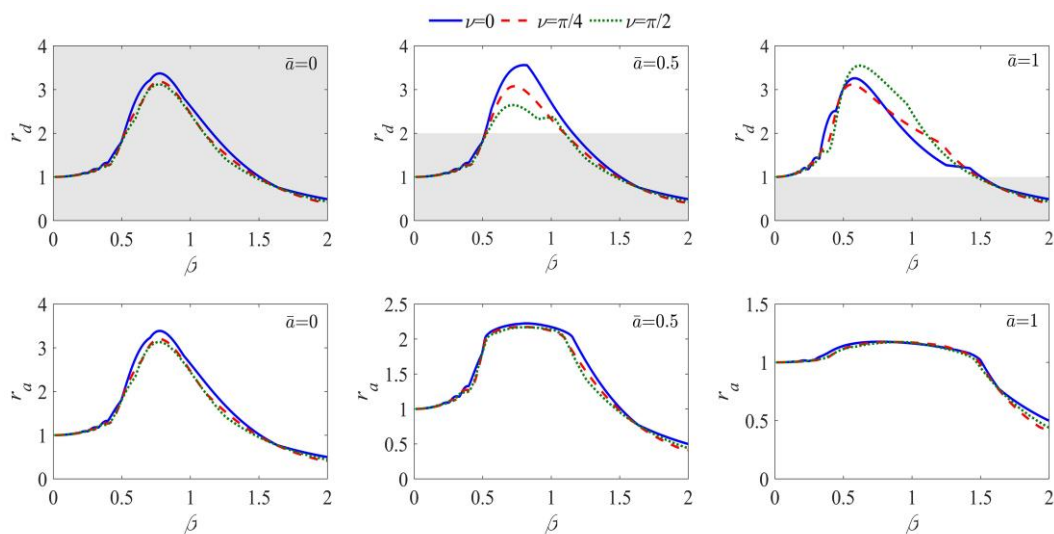
بیشتری به پاسخ حاصل از تحریک هارمونیک با ماندگاری کامل پیدا می‌کند. البته باید توجه داشت که حتی با افزایش  $\gamma$  به سمت بی‌نهایت، باز دقیقاً تحریک هارمونیک با دامنه‌ی ثابت حاصل نمی‌شود؛ زیرا در مدل ریاضی تحریک پالسی شکل ماورویدیس، پوش زنگوله‌یی شکل برای پالس‌های متوالی در نظر گرفته شده است.

از طرف دیگر، وقتی رفتار غیرخطی در  $\bar{a}$  های بزرگ‌تر از صفر اتفاق می‌افتد، همچنان انتقال بسامد تشدید (موقعیت قله) از چپ به راست با افزایش پارامتر  $\gamma$  از ۱ تا ۳ در هر دو پاسخ  $r_d$  و  $r_a$  مشاهده می‌شود؛ در حالی که از نظر اندازه‌ی پاسخ تشدید (قله)، روند مشاهده‌شده در مورد  $r_d$  و  $r_a$  با هم و همچنین با حالت رفتار خطی متفاوت بوده است. به این ترتیب که در ترازهای رفتار غیرخطی مختلف، افزایش  $\gamma$  موجب تغییرات محسوس در بیشینه‌ی مقدار پاسخ بسامدی شتاب کل نمی‌شود، ولی بیشینه‌ی مقدار پاسخ بسامدی جابجایی به صورت‌های مختلف و نه یک‌سویه تغییر می‌کند.

در شکل‌های ۶ و ۷ همچنین مشاهده می‌شود که شیفت موقعیت قله‌های پاسخ‌های بسامدی از چپ به راست با افزایش  $\gamma$  (چه در رفتار خطی و چه غیرخطی) باعث می‌شود که در مقادیر بسامدی کمی کمتر از نواحی تشدید، معمولاً تعداد پالس کمتر ( $\gamma \approx 1$ ) موجب پاسخ بزرگ‌تر شود، در حالی که در مقادیر بسامدی بیشتر از مقادیر تشدید، تعداد پالس بیشتر ( $\gamma = 3$ )، پاسخ بزرگ‌تر را رقم زند.

#### ۳.۴. بررسی اثر زاویه‌ی فاز پالس

در بخش کنونی، برای بررسی آثار زاویه‌ی فاز پالس در پاسخ‌های بسامدی سازه، برای این پارامتر سه مقدار  $U=0, \pi/4, \pi/2$  در نظر گرفته شده است. مقادیر  $0$  و  $\pi/2$  به ترتیب متناظر با حالت پالس متقارن و پادمتقارن هستند. برای مشاهده‌ی رفتار خطی و غیرخطی با شدت‌های مختلف نیز  $1, 0/5, 0$  فرض شده است. تعداد پالس  $\gamma=2$  و خصوصیات سازه نیز مثل قسمت‌های قبل بوده است، یعنی سازه با رفتار کشسان-خمیری کامل ( $\alpha=0$ ) و میرایی  $\xi=0/5$  فرض شده است.



شکل ۹. تأثیر مشخصه‌ی فاز پالس ( $U$ ) در منحنی‌های پاسخ بسامدی نسبت جابجایی و نسبت شتاب کل سازه تک درجه‌ی آزاد با رفتار کشسان-خمیری کامل ( $\alpha=0$ ) و میرایی  $\xi=0/5$  تحت پالس ماورویدیس با تعداد پالس  $\gamma=2$ .

ندارد. [۲۱ و ۲۲] همچنین در  $\beta$  های خیلی کوچک، زمان دوام بارگذاری پالسی نسبت به زمان تناوب طبیعی سازه بسیار زیاد و خصوصیات بارگذاری استاتیکی حاکم بوده است، که در این حالت نیز میرایی تأثیری در پاسخ سازه نداشته است.

در نواحی میانی بسامدی، با افزایش میرایی از جابجایی سازه چه در رفتار خطی و چه در رفتار غیرخطی با شدت‌های مختلف کاسته شده است. برای پاسخ شتاب کل نیز در حالت رفتار خطی این‌گونه بوده است، ولی در صورت بروز رفتار غیرخطی، تأثیر میرایی برعکس می‌شود؛ لذا در کلیه بسامدهای تحریک متنظر با پاسخ غیرخطی در حالت میرایی صفر برای سازه‌ی مفروض، که کشسان-خمیری کامل است، شتاب کل ثابت نتیجه می‌شود. با توجه به صورت معادله‌ی حرکت سیستم یعنی رابطه‌ی ۶، برای سازه‌ی نامیرا، شتاب کل برابر  $f_s(u)/m$  بوده است، که در حالت رفتار کشسان-خمیری، بیشینه‌ی مقدار زمانی آن در صورت بروز تسلیم در سازه برابر با مقدار ثابت  $F_y/m$  خواهد بود. بنابراین، به ازاء بسامدهای تحریک مختلف، همواره برای  $r_a$  مقدار ثابت  $r_a = \sqrt{\bar{a}}$  حاصل می‌شود.

نحوه تأثیر میرایی در تشدید جابجایی و شتاب سازه با رفتار خطی به این ترتیب است که بیشینه‌ی مقدار بسامدی  $r_d$  و  $r_a$  در حالت نامیرا به ترتیب از  $4/60$  و  $4/60$  به  $3/39$  و  $3/39$  در حالت میرایی  $0/05$  کاهش یافت است، که معادل کاهشی در حدود  $27\%$  برای هر دو پاسخ بوده است.

**۵.۴ بررسی اثر نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم سازه**

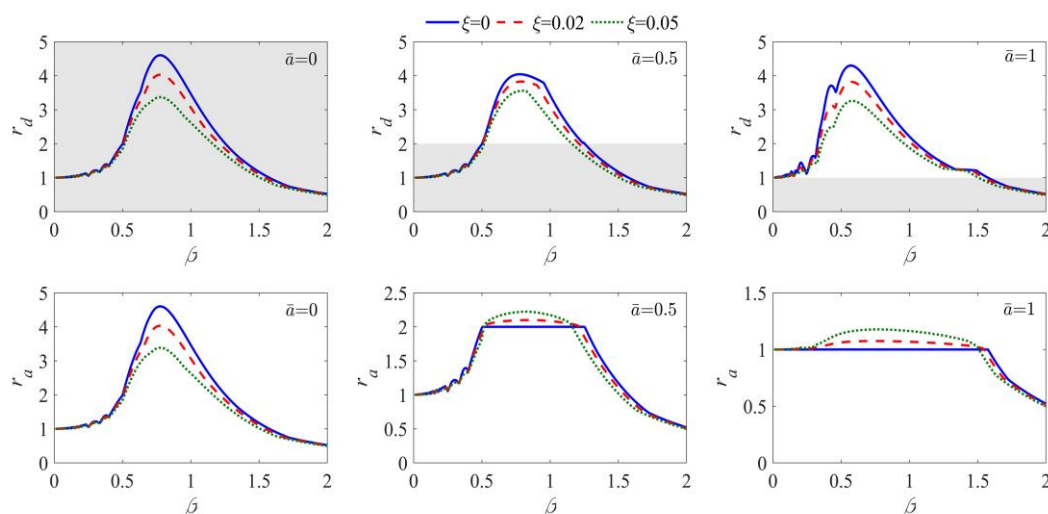
در بخش حاضر، اثر تغییرات نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم سازه در محدوده‌های کم ( $0/1 \sim 0$ )، که در سازه‌های متداول رایج است، بررسی شده است. برای این منظور، سه مقدار  $0/1$ ،  $0/05$ ،  $0$ ،  $\alpha$  در نظر گرفته شده و مقادیر عددی سایر پارامترهای پالس و سازه مثل بخش‌های پیشین بوده است. در اینجا چون سخت‌شوندگی بعد از تسلیم سازه، تأثیری در پاسخ‌های سازه‌ی که وارد ناحیه‌ی خمیری نمی‌شوند، ندارد، حالت  $\bar{a} = 0$  نیاز به ارائه و ارزیابی نداشته است.

### ۵. ارزیابی توابع پاسخ در یک ساختمان چندطبقه تحت پالس

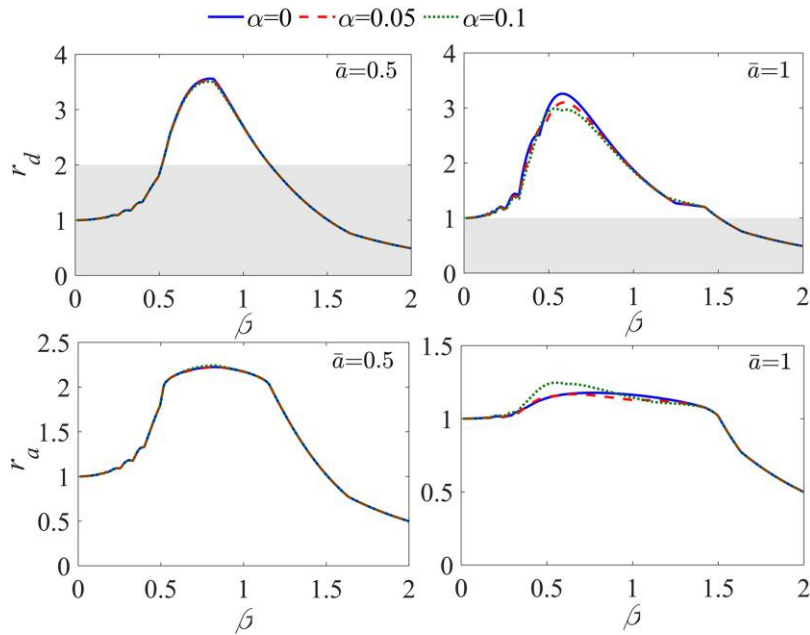
#### ماورویدیس

در سازه‌ی چند درجه‌ی آزادی، بسیاری متغیرهای دیگر، مثل تعداد طبقات، نحوه‌ی توزیع جرم، نحوه‌ی توزیع سختی، نحوه‌ی توزیع میرایی، و نحوه‌ی توزیع مقاومت تسلیم نیز به متغیرهای مسئله افزوده می‌شود و عملاً امکان مطالعه‌ی پارامتری با در نظر گرفتن همه‌ی پارامترهای حاکم بر مسئله-همانند آنچه در مورد سیستم تک‌درجه‌ی آزاد صورت گرفته است- وجود نخواهد داشت. در بخش حاضر، صحیح بودن برخی نتایج به‌دست‌آمده برای سیستم تک‌درجه‌ی آزاد همانند تشابه توابع پاسخ جابجایی نسبی و شتاب کل در سازه با رفتار کشسان خطی و یا تأثیر اندک زاویه‌ی فاز پالس ورودی در پاسخ‌های سازه‌ی کشسان خطی، در یک ساختمان چندطبقه آزموده شده است.

برای این منظور، از مدل جرم متمرکز و کشسان ساختمان ۱۰ طبقه، که در نوشتار سادک و همکاران (۱۹۹۷)، [۲۷] ارائه شده است، استفاده شده است. سازه‌ی ساختمانی ۱۰ طبقه‌ی مذکور، دارای زمان تناوب مود اول  $2/02$  ثانیه و نسبت میرایی  $2\%$  در مود اول بوده است. جرم و سختی هر کدام از طبقات سازه به صورت جدولی در مرجع مذکور ارائه شده است. دوره‌ی تناوب پالس



شکل ۱۰. تأثیر نسبت میرایی ( $\xi$ ) در منحنی‌های پاسخ بسامدی نسبت جابجایی و نسبت شتاب کل سازه‌ی تک‌درجه‌ی آزاد با رفتار کشسان-خمیری کامل ( $\alpha = 0$ ) تحت پالس ماورویدیس با شکل متقارن ( $U = 0$ ) و تعداد پالس  $\gamma = 2$ .

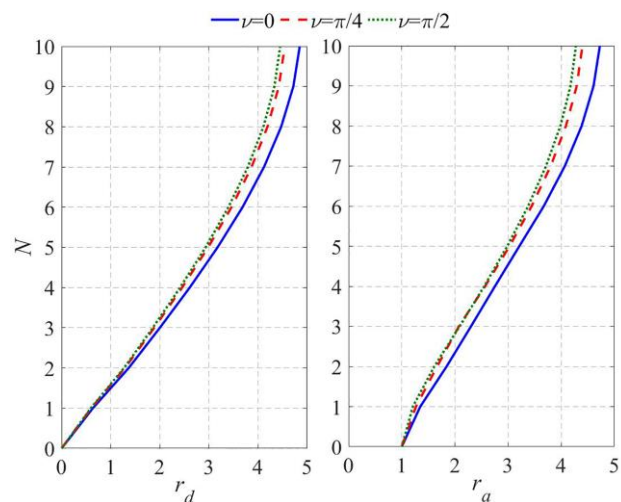


شکل ۱۱. تأثیر نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم ( $\alpha$ ) در منحنی‌های پاسخ بسامدی نسبت جابجایی و نسبت شتاب کل سازه‌ی تک‌درجه‌ی آزادی با میرایی  $\xi = 0.05$  تحت پالس ماوروییدیس با شکل متقارن ( $U=0$ ) و تعداد پالس  $\gamma=2$ .

همچنین ملاحظه می‌شود که همانند سازه‌های تک‌درجه‌ی آزاد، در حالی که تأثیر تغییر زاویه‌ی فاز پالس ورودی در هر دو پاسخ چشمگیر نبوده؛ بیشترین پاسخ‌ها از زاویه‌ی فاز  $U=0$  و کمترین پاسخ‌ها از  $U=\pi/2$  به دست آمده است. تغییر زاویه‌ی پالس از  $U=0$  به  $U=\pi/4$  منجر به کاهش ۵ تا ۶ درصدی در پاسخ جابجایی طبقات شده است، که کمینه و بیشینه‌ی کاهش اخیر به ترتیب مربوط به طبقه‌های اول و آخر بوده است. در صورت تغییر زاویه‌ی پالس از  $U=0$  به  $U=\pi/2$ ، مجدداً فقط کاهش ۶٪ (طبقه‌ی اول) الی ۸٪ (طبقه‌ی آخر) در پاسخ جابجایی طبقات مشاهده می‌شود. در مورد پاسخ شتاب کل نیز تغییرات مابین ۷٪ (طبقه‌ی پنجم) تا ۱۲٪ (طبقه‌ی دوم) بوده است.

### ۶. نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، استخراج و ارزیابی پارامتریک پاسخ‌های بسامدی سازه‌های تک‌درجه‌ی آزادی کشسان خطی و ناکشسان دوخطی تحت تحریک‌های پالس‌گونه‌ی زمین بوده است. پاسخ‌های مدنظر، جابجایی نسبی و شتاب کل سازه بوده است، که به صورت نسبت‌های بی‌بعدشده بر حسب دامنه‌ی تحریک ورودی (یعنی  $r_d$  و  $r_a$ ) ارائه شده‌اند. ابتدا تحلیل دینامیکی غیرخطی با پارامترهای بی‌بعد تحت تحریک‌های پالس‌گونه‌ی زمین به فرم پالس ماوروییدیس فرمول‌بندی شده است. نتایج تحلیل را کلاً ۶ متغیر بی‌بعد کنترل کرده است، 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 است؛ که به ترتیب عبارت‌اند از: تعداد پالس ( $\gamma$ )، زاویه‌ی فاز پالس ( $U$ )، نسبت میرایی سازه ( $\xi$ )، نسبت سخت‌شوندگی بعد از تسلیم سازه ( $\alpha$ )، نسبت بسامد تحریک (پالس) به بسامد طبیعی سازه ( $\beta$ )، و نسبت دامنه‌ی تحریک (پالس) به مقاومت سازه ( $\bar{a}$ ). پاسخ‌های به دست آمده برای نسبت جابجایی و شتاب کل به صورت توابع بسامدی یعنی توابعی از  $\beta$  و با تغییر هر کدام از ۵ پارامتر بی‌بعد دیگر در محدوده‌های کاربردی ارائه و ارزیابی شده‌اند. در انتها، یک نمونه‌ی ارزیابی پاسخ‌های سازه‌ی چندطبقه نیز ارائه شده



شکل ۱۲. توزیع ارتفاعی نسبت جابجایی و نسبت شتاب کل سازه‌ی ۱۰ طبقه تحت پالس ماوروییدیس با دوره‌ی تناوب پالس  $T_p = 3$  S، تعداد پالس  $\gamma=2$ ، و سه زاویه‌ی فاز ( $U$ ) مختلف.

ورودی،  $T_p = 3$  S و تعداد پالس  $\gamma=2$  فرض شده است. برای زاویه‌ی فاز پالس ورودی نیز سه مقدار  $U=0, \pi/4, \pi/2$  در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل به صورت بیشینه‌ی جابجایی طبقات و بیشینه‌ی شتاب کل طبقات در قالب نسبت‌های بی‌بعد  $r_d$  و  $r_a$  در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود؛ که در آن،  $N$  بیانگر شماره‌ی طبقه است. این تذکر لازم است که نسبت شتاب کل در هر طبقه همچنان مطابق رابطه‌ی ۱۰ بر حسب شتاب زمین نرمال شده است. همچنین، برای تعریف نسبت جابجایی هر طبقه نیز بسامد مود اول سازه ( $\omega_1$ ) به جای پارامتر بسامد در رابطه‌ی ۹ استفاده شده است. مطابق شکل اخیر، مقادیر به دست آمده برای توزیع ارتفاعی هر دو پاسخ در سازه‌ی کشسان چندطبقه‌ی مذکور نیز تا حد زیادی مشابه هم بوده و بیشترین مقادیر  $r_d$  و  $r_a$  در طبقه‌ی آخر و در حالت زاویه‌ی فاز صفر برای پالس ورودی حاصل شده است، که به ترتیب برابر با  $4/85$  و  $4/73$  بوده است.

هم در ترازهای مختلف رفتار غیرخطی تعداد پالس‌های مختلف می‌تواند باعث ایجاد بیشینه‌ی پاسخ شود.

- تغییر زاویه‌ی فاز پالس ورودی باعث تغییرات چشمگیری در منحنی‌های پاسخ بسامدی شتاب کل و جابجایی سازه با رفتار کشسان خطی نمی‌شود (بیشینه‌ی تغییرات در حدود ۸٪). در صورت بروز رفتار غیرخطی، همچنان تأثیر  $U$  در  $r_a$  اندک است؛ ولی در مورد  $r_d$  می‌تواند باعث تغییرات چشمگیری شود.

- در ابتدا و انتهای منحنی‌های پاسخ بسامدی، تغییر میرایی سازه تأثیری در پاسخ‌ها ندارد. در نواحی میانی بسامدی، با افزایش میرایی از جابجایی سازه چه در رفتار خطی و چه در رفتار غیرخطی با شدت‌های مختلف کاسته شده است. برای پاسخ شتاب کل نیز همین روند در حالت رفتار خطی مشاهده شده است، ولی در صورت بروز رفتار غیرخطی تأثیر میرایی می‌توانست برعکس باشد. با افزایش میرایی از صفر به ۰/۰۵، تشدیدهای جابجایی و شتاب سازه با رفتار خطی در حدود ۲۷٪ کاسته می‌شوند.

- ارزیابی پاسخ‌های یک سازه‌ی ۱۰ طبقه نشان داد که همانند نتایج حاصل از سیستم‌های تک‌درجه‌ی آزاد، توابع پاسخ جابجایی و شتاب کل نرمال شده در سازه‌ی چند درجه‌ی آزاد با رفتار کشسان خطی مشابه هم هستند و تأثیر تغییر زاویه‌ی فاز پالس ورودی در هر دو پاسخ کشسان سازه اندک است.

است. بر روی نتایج حاصل به‌صورت مفصل در بخش‌های پیشین بحث شده است، که در بخش حاضر، خلاصه‌ی از اهم آن‌ها ارائه شده است:

- در حالی که در سازه با رفتار کشسان خطی، توابع پاسخ بسامدی شتاب کل و جابجایی شباهت بسیاری به هم دارند؛ در سازه با رفتار خمیری، خصوصیات دو پاسخ مذکور کاملاً باهم متفاوت هستند.

- در حالی که  $\bar{a} = 0$  تضمین‌کننده‌ی رفتار کشسان خطی سازه است،  $\bar{a} > 0$  می‌تواند باعث پاسخ ناکشسان در برخی بسامدهای تحریک نسبی و یا پاسخ کشسان خطی در برخی نواحی دیگر بسامدی شود. در بارگذاری دینامیکی، برای حصول رفتار ناکشسان، همانند بارگذاری استاتیکی معادل نیازی به  $\bar{a} > 1$  نیست.

- 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 یافته است، ولی جابجایی سازه می‌تواند کاسته یا افزوده شود.

- در سازه با رفتار کشسان خطی، بیشینه‌ی پاسخ بسامدی جابجایی و شتاب کل با افزایش تعداد پالس در محدوده‌ی متداول آن  $1 < \gamma \leq 3$ ، همواره افزوده شده است (افزایشی در حدود ۳۴٪ برای هر دو پاسخ)، ولی در سازه با رفتار کشسان-خمیری به‌هنگام بروز پاسخ غیرخطی، بیشینه‌ی پاسخ بسامدی شتاب کل مستقل از تعداد پالس ورودی تقریباً ثابت مانده است. در مورد جابجایی

## Reference - منابع

1. Biggs, J.M., 1964. *Introduction to Structural Dynamics*, McGraw-Hill, New York.
2. Hall, J.F., Heaton, T.H., Halling, M.W. and Wald, D.J., 1995. Near-source ground motion and its effects on flexible buildings. *Earthquake Spectra*, 11(4), pp. 569-605. doi.org/10.1193/1.1585828.
3. Makris, N., and Chang, S.P., 2000. Response of damped oscillators to cycloidal pulses. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(2), pp. 123-131. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:2(123).
4. Mylonakis, G., and Reinhorn, A.M., 2001. Yielding oscillator under triangular ground acceleration pulse. *Journal of Earthquake Engineering*, 5(2), pp. 225-251. doi.org/10.1080/13632460109350393.
5. Menun, C., and Fu, Q., 2002. 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.
6. Mavroeidis, G.P., and Papageorgiou, A.S., 2003. A mathematical representation of near-fault ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(3), pp. 1099-1131. doi.org/10.1785/0120020100.
7. Alavi, B., and Krawinkler, H., 2004. Behavior of moment-resisting frame structures subjected to near-fault ground motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 33(6), pp. 687-706. doi.org/10.1002/eqe.369.
8. He, W.L., and Agrawal, A.K., 2008. Analytical model of ground motion pulses for the design and assessment of seismic protective systems. *Journal of Structural Engineering*, 134(7), pp. 1177-1188. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:7(1177).
9. Moustafa, A., and Takewaki, I., 2010. Deterministic and probabilistic representation of near-field pulse-like ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake*

- Engineering*, 30(5), pp. 412-422. doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.12.013.
10. Waezi, Z., and Balzadeh, S., 2022. Simulation of near-field pulse-like ground motions using a correlated bimodal fractional stochastic model. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 161, pp. 107434. doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107434.
  11. Cuesta, I., and Aschheim, M.A., 2004. The use of simple pulses to estimate inelastic response spectra. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(6), pp. 865-893. doi.org/10.1080/13632460409350512.
  12. Makris, N., and Black, C.J., 2004. Dimensional analysis of rigid-plastic and elastoplastic structures under pulse-type excitations. *Journal of Engineering Mechanics*, 130(9), pp. 1006-1018. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:9(1006).
  13. Mavroeidis, G.P., Dong, G. and Papageorgiou, A.S., 2004. Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 33(9), pp. 1023-1049. doi.org/10.1002/eqe.391.
  14. Makris, N., and Psychogios, T., 2006. Dimensional response analysis of yielding structures with first-mode dominated response. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(10), pp. 1203-1224. doi.org/10.1002/eqe.578.
  15. Mylonakis, G., and Voyagaki, E., 2006. Yielding oscillator subjected to simple pulse waveforms: numerical analysis & closed-form solutions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(15), pp. 1949-1974. doi.org/10.1002/eqe.615.
  16. Alonso-Rodríguez, A., and Miranda, E., 2015. Assessment of building behavior under near-fault pulse-like ground motions through simplified models. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 79, pp. 47-58. doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.08.009.
  17. Guo, G., Yang, D., and Liu, Y., 2018. Duration effect of near-fault pulse-like ground motions and identification of most suitable duration measure. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16, pp. 5095-5119. doi.org/10.1007/s10518-018-0386-9.
  18. Yang, D., Guo, G., Liu, Y., and Zhang, J., 2019. Dimensional response analysis of bilinear SDOF systems under near-fault ground motions with intrinsic length scale. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116, pp. 397-408. doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.10.034.
  19. Konstandakopoulou, F., and Hatzigeorgiou, G., 2020. Constant-ductility inelastic displacement, velocity and acceleration ratios for systems subjected to simple pulses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 131, pp. 106027. doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.106027.
  20. Akehashi, H., and Takewaki, I., 2022. 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*, 157, pp. 107254. doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107254.
  21. Clough, R.W., and Penzien, J., 2003. *Dynamics of Structures*. 3rd Edition, Computer and structure, Inc., Berkeley.
  22. Chopra, A.K., 2012. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. 4th Edition, Prentice Hall, USA.
  23. Caughey, T.K., 1960. Sinusoidal excitation of a system with bilinear hysteresis. *Journal of Applied Mechanics*, 27(4), pp. 640-643. doi.org/10.1115/1.3644075.
  24. Miller, G.R., and Butler, M.E., 1988. Periodic response of elastic-perfectly plastic SDOF oscillator. *Journal of Engineering Mechanics*, 114(3), pp. 536-550. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1988)114:3(536).

25. Liu, C.S., and Huang, Z.M., 2004. The steady state responses of sdof viscous elasto-plastic oscillator under sinusoidal loadings. *Journal of Sound and Vibration*, 273(1-2), pp. 149-173. doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00423-1.
26. Kalmar-Nagy, T., and Shekhawat, A., 2009. Nonlinear dynamics of oscillators with bilinear hysteresis and sinusoidal excitation. *Physica D*, 238(17), pp. 1768-1786. doi.org/10.1016/j.physd.2009.06.016.
27. Sadek, F., Mohraz, B., Taylor, A.W., and Chung, R.M., 1997. A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 26(6), pp. 617-35. doi.org/10.1002/(SICI)10969845(199706)26:6%3C617::AID-EQE664%3E3.0.CO;2-Z.