

بررسی احتمالاتی جابه‌جایی شمع تحت اثر بار دینامیکی با استفاده از روش وینکلر

علی جوهری* (دانشیار)

رقیه شیروانی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز

در طی زلزله‌های پیشین، تعداد زیادی از شمع‌های استفاده شده دچار آسیب شده‌اند که متأسفانه در نمونه‌های کمی از آن‌ها، اطلاعاتی قابل استفاده به ثبت رسیده است. هدف از پژوهش حاضر، مدل‌سازی شمع و خاک براساس روش وینکلر و آنالیز احتمالاتی آن تحت بار دینامیکی زلزله با اعمال عدم قطعیت در پارامترهای ورودی خاک و بتن است. برای این منظور با برنامه‌نویسی در محیط متلب، آنالیز دینامیکی در حوزه‌ی زمان با استفاده از روش نیومارک و شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌عنوان ابزاری جهت آنالیز احتمالاتی با یکدیگر ادغام شدند تا توزیع احتمالاتی جابه‌جایی، سرعت و شتاب هر نقطه از شمع تعیین شود. جهت صحت‌سنجی، نتایج جابه‌جایی شمع و طیف پاسخ شتاب ساختگاه در حالت قطعی مقایسه شده است. از جمله مهم‌ترین دستاوردهای پژوهش حاضر، می‌توان به تعیین تابع توزیع احتمال بیشینه‌ی جابه‌جایی شمع و بررسی احتمالاتی تأثیر طول شمع در جابه‌جایی آن در یک آنالیز دینامیکی اشاره کرد.

واژگان کلیدی: بار دینامیکی، روش وینکلر، عدم قطعیت، جابه‌جایی شمع، روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو.

۱. مقدمه

زلزله یکی از مهم‌ترین منابع تولید بارهای دینامیکی است که می‌تواند باعث نشست پی‌ها، کج شدن ساختمان‌ها، روان شدن لایه‌های مستعد خاک و بالاخره شناور شدن ساختمان‌های سبک شود. یکی از راه‌های مؤثر به منظور مقابله با آثار زلزله در ساختمان‌ها و مشکلات عنوان شده، استفاده از پی‌های عمیق است. به لحاظ کارایی پی‌های عمیق، پژوهش‌های متعددی توسط برخی پژوهشگران در این زمینه صورت پذیرفته است که مجموعه‌ی آن‌ها به ۳ روش: پیوسته، وینکلر و المان محدود قابل تقسیم‌بندی هستند. روش‌های پیوسته، یک آنالیز به شکل بسته را تشکیل می‌دهند که در آن خاک به‌عنوان یک نیمه فضای نامحدود در نظر گرفته می‌شود. مزیت اصلی روش‌های پیوسته نسبت به دو روش دیگر، در نظر گرفتن میرایی تابشی به‌صورت خودکار است. از طرفی از مهم‌ترین عیوب روش پیوسته، قابل استفاده بودن آن فقط برای مواد ویسکوکشسان است. علی‌رغم این محدودیت، روش پیوسته جهت درک بهتری از اندرکنش شمع - خاک و به دست آوردن توضیح تحلیلی از پارامترها، مانند مدول واکنش بستر و سبک (۱۹۶۱) که در مدل وینکلر استفاده می‌شود، مفید است.^[۱] با استفاده از روش پیوسته، نوک (۱۹۷۴) یک

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۱۲/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۶/۱۲/۲۶، پذیرش ۱۳۹۷/۲/۲۷

DOI:10.24200/J30.2018.50077.2281

مدل پیوسته‌ی تقریبی برای توضیح اندرکنش شمع - خاک ارائه کرد که در آن خاک توسط مجموعه‌ی از لایه‌های مستقل افقی با ضخامت بسیار کوچک که تا بی‌نهایت گسترش یافته بودند، مدل‌سازی شده است.^[۲] نوک (۱۹۷۴) با در نظر گرفتن یک کلاه شمع صلب برای یک گروه شمع و سرشمع منفرد، پیشنهاد کرد که میرایی و سختی معادل ثابت در نظر گرفته شوند. مدل عددی پیشنهادی نوک برای مقایسه‌ی واکنش پی گسترده با فونداسیون شمع استفاده شده است.^[۲] علاوه بر این، روش نوک به روش تاجیمی (۱۹۶۶) که بر پایه‌ی روش تجزیه و تحلیل‌های دقیق سه بعدی استوار بوده است، با افزایش بسامد نزدیک می‌شود.^[۳] نوگامی و نوک (۱۹۸۰)، اقدام به مقایسه‌ی روش پیوسته با مدل وینکلر کردند و برای این منظور، ضریب پاسخ دینامیکی خاک به حرکت شمع و رفتار خاک به‌عنوان یک محیط پیوسته‌ی سه بعدی با این فرض که هیچ رابطه‌ی بین اتصال شمع - خاک و حرکت آن‌ها وجود ندارد، را مطالعه کردند.^[۴]

در روش وینکلر، خاک توسط فنرهای سری مدل می‌شود. با توجه به استفاده از روش پیوسته در پژوهش حاضر، شرح بیشتر روش پیوسته به بخش بعد واگذار شده است. برگر و همکارانش (۱۹۷۷) و همچنین وانگ و همکارانش (۱۹۹۸)، در استفاده از روش پیوسته، فرض وارد شدن امواج P به فرم یک بعدی و در راستای زلزله و امواج S عمود بر شمع وارد را مدنظر قرار دادند.^[۵] نوک و همکارانش

(۱۹۷۸)، با استفاده از روش پیوسته، مدل دقیق‌تری از رفتار شمع را ارائه کردند که در آن، خاک در حالت کرنش صفحه‌یی و به صورت کشسان خطی، ایزوتروپیک و همگن در نظر گرفته شده است. آن‌ها شمع را تحت بارگذاری یکنواخت در یک محیط نیمه بی‌نهایت بررسی کردند. نتایج پژوهش اخیر نشان می‌دهد که حل این مسئله در حالت سه‌بعدی نسبت به حالت دو بعدی آسان‌تر است.^[۷] همچنین متلاک و همکارانش (۱۹۷۸)، از روش $p - y$ برای توضیح سختی جانبی مدل شمع - خاک جهت تجزیه و تحلیل لرزه‌یی با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی شمع و خاک استفاده کردند.^[۸] مدل اخیر، توسط برخی دیگر از پژوهشگران نیز از جمله: پولم و همکارانش (۱۹۹۸)، وانگ و همکارانش (۱۹۹۸)، هاجینسون و همکارانش (۲۰۰۴)، استفاده شده است.^[۹] مدلی براساس میرایی و سختی سیستم شمع - خاک توسط کاگاو و گرفت (۱۹۸۰) و بادونی و ماکریس (۱۹۹۶)، با استفاده از روش تیر بر روی فونداسیون غیرخطی وینکلر ارائه شده است که در مسائل غیرخطی اندرکنش شمع - خاک استفاده شده است.^[۱۰]

گازتاس و دوبری (۱۹۸۴) و (b) (۱۹۸۴)، نسبت به ارائه‌ی یک مدل ساده‌تر که در آن امواج کششی - فشاری در دو جهت در راستای بارگذاری و امواج S در دو جهت عمود بر راستای بارگذاری منتشر می‌شوند، اقدام کردند.^[۱۱] بتلی و ال ناگرا (۲۰۰۰)، ارتباطی بین مدل اخیر و منحنی $p - y$ با دو فنر سری معادل برای میدان نزدیک و میدان دور ایجاد کردند. سختی‌های غیرخطی به دست آمده، میدان نزدیک و فنرهای سری رفتاری، مانند فنرهای $p - y$ داشتند.^[۱۲] پژوهش‌های متنوعی به فرم دوبعدی و سه‌بعدی با استفاده از روش اجزاء محدود جهت ارزیابی شمع‌ها تحت بار جانبی صورت پذیرفته است. در سال‌های اخیر، پژوهشگران نسبت به بهبود آنالیز عددی اقدام کرده‌اند، به طوری که در آن‌ها: خاک، شمع و سطح تماس شمع و خاک با هم شبیه‌سازی شده‌اند. پارمل (۱۹۶۴)، نوواک (۱۹۷۴) و نوواک و همکاران (۱۹۷۸)، مطالعاتی در رابطه با پاسخ دینامیکی شمع‌ها و برهم کنش خاک و شمع و تنش کشسان دینامیکی و جابه‌جایی‌های محل با استفاده از یک مدل غیرخطی پیوسته ارائه داده‌اند.^[۱۳]

همچنین راندلف (۱۹۸۱)، فاروک و دسای (۱۹۸۲)، تروچانیس و همکاران (۱۹۹۱) و فین و وو (۱۹۹۷)، از روش اجزاء محدود برای آنالیز دینامیکی شمع با در نظر گرفتن خاک به عنوان یک جرم پیوسته اقدام کردند.^[۱۴] در سال ۲۰۰۰، نیز یک مدل اجزاء محدود با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک و معرفی حد تسلیم دراگر - پراگر، ایجاد موج توسط بارگذاری بر پایین مدل، و شرایط غیرپیوستگی در سطح تماس شمع - خاک و معرفی المان‌های تماسی که می‌تواند باعث ایجاد لغزش شوند، ارائه شده است که برای مقایسه‌ی عکس‌العمل خاک با عکس‌العمل سیستم شمع - خاک و پاسخ دینامیکی شمع - خاک استفاده شده است.^[۱۵]

عدم تطبیق فرضیات به کار گرفته شده در مدل‌سازی با شرایط واقعی و همچنین خطاهای انسانی و دستگاهی، باعث غیرقابل اعتماد شدن نتایج به دست آمده از روش‌های قطعی شده است. در حالی که با استفاده از روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان با توجه به اعمال عدم قطعیت در پارامترهای مسئله و به کارگیری منحنی توزیع احتمال پارامترهای مورد بررسی به جای فقط یک مقدار قطعی، منحنی توزیع قابل محاسبه است و لذا نحوه‌ی تغییرات و حدود تغییرات مسئله‌ی مورد نظر به ازاء تمامی مقادیر محتمل برای پارامترهای موجود در مسئله، می‌تواند توسط کاربر بررسی شود.

اوکادو (۲۰۱۶) در ارزیابی پاسخ لرزه‌یی شمع با در نظر گرفتن عدم قطعیت در

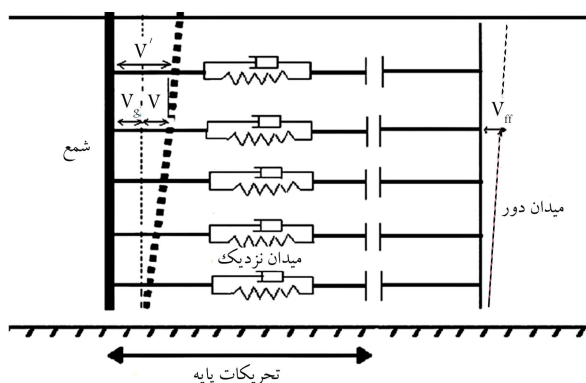
خواص خاک و مدول یانگ شمع، از یک روش طیف پاسخ در ارزیابی پاسخ‌های لرزه‌یی شمع استفاده کرده و نتایج حاصل نشان داده است هنگامی که خواص خاک (سختی و میرایی) به عنوان پارامترهای نامعین در نظر گرفته شوند، بیشینه‌ی لنگر خمشی سر شمع در سیستم سازه - شمع - خاک با استفاده از روش طیف پاسخ با در نظر گرفتن همبستگی مودال ارزیابی می‌شود.^[۱۶]

در سال ۲۰۱۷، نیز تجزیه و تحلیل لرزه‌یی بر روی شمع‌ها با استفاده از معادله‌ی موج یک‌بعدی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو توسط چانگ و همکارانش انجام و پاسخ لرزه‌یی شمع‌ها در طیف وسیعی از شدت زلزله بررسی شده است. با بررسی احتمال خرابی شمع‌ها برای عدم قطعیت در پارامترهای خاک و رکورد زلزله این نتیجه حاصل شد که نیروی لرزه‌یی، مهم‌ترین عامل خرابی است. همچنین به کار بردن شمع با قطر زیاد می‌تواند باعث ایجاد ترک‌هایی در اطراف سر شمع تحت اثر زلزله‌های متوسط شود.^[۱۷]

علی‌رغم تحقیقات غیرقطعی انجام شده در خصوص بررسی رفتار لرزه‌یی شمع‌ها، اما تاکنون پژوهش غیرقطعی با استفاده از روش وینکلر و به منظور استفاده از مزیت‌های آن ارائه نشده است. در پژوهش حاضر تلاش شده است تا با تکیه بر توانایی‌های روش وینکلر و بهره‌بری از دقت بالای روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو^۱، نسبت به تعیین جابه‌جایی غیرقطعی شمع ناشی از بار دینامیکی در حوزه‌ی زمان و با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای ورودی مسئله اقدام شود. برای این منظور، با کدنویسی در محیط برنامه‌نویسی متلب^۲ نسبت به تعیین یک مدل احتمالاتی جدید و متفاوت با مدل‌های ارائه شده‌ی پیشین اقدام شده است. لذا با در نظر گرفتن شمع به صورت المان‌هایی از تیر و سختی و میرایی خاک توسط فنرها و میراگرهای خطی و در نهایت زلزله، نیروی دینامیکی وارد بر بستر صلب وارد شده است. جهت صحت‌سنجی نتایج در حالت قطعی از نرم‌افزار پلاکسیس^۳ استفاده و طیف پاسخ شتاب حاصل از هر دو نرم‌افزار با یکدیگر مقایسه شده است. در نهایت، تابع توزیع احتمال جابه‌جایی نسبی نوک شمع به دست آورده شده است.

۲. روش وینکلر

در روش وینکلر، مدل‌سازی خاک با فنر خطی و میراگر در میدان نزدیک و همچنین تعدادی فنر خطی و میراگر در میدان دور مدل‌سازی می‌شود. میرایی، پراکندگی انرژی است و جزء رفتار ذاتی ماده به حساب می‌آید و از این رو در روش وینکلر با یک میراگر موازی با فنر، که سختی خاک را نشان می‌دهد، مدل می‌شود. شکل ۱،



شکل ۱. مدل وینکلر جهت آنالیز دینامیکی شمع تحت اثر بار جانبی.^[۱۸]

همچنین ماتریس سختی خاک به صورت رابطه ۶ تعریف می شود:

$$K^S = EI \int_0^L N_i^n N_j^n dx = \frac{K_h L}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

که در آن، K_h نشان دهنده سختی خاک است. در نهایت، ماتریس سختی کل المان شمع - خاک به صورت معادله ۷ محاسبه می شود:

$$K = K^p + K^S = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & 6L & 2L^2 \\ -12 & 6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} + \frac{K_h L}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

جهت محاسبه ماتریس جرم، گروهی از پژوهشگران جرم خاک را به صورت شعاعی از خاک اطراف در نظر می گیرند. اما برخی دیگر، جهت ساده سازی و با یک تقریب مناسب از جرم خاک صرف نظر می کنند. در پژوهش حاضر، نیز فقط جرم شمع در نظر گرفته شده است که به صورت رابطه ۸ تعریف می شود.^[۲۲]

$$M^p = \rho A \int_0^L N_i N_j dx = \frac{mL}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

که در آن، m جرم واحد طول شمع و ρA جرم شمع است. از آنجا که میرایی شمع بسیار ناچیز است، در محاسبات میرایی المان شمع - خاک، فقط از میرایی خاک استفاده و از میرایی شمع چشم پوشی شده است. c در معادله ۹، نشان دهنده میرایی شمع است.^[۲۲]

$$C = c \int_0^L N_i^n N_j^n dx = \frac{cL}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

بعد از به دست آوردن ماتریس های جرم، سختی و میرایی سیستم شمع - خاک و ساده سازی معادله ۳ به فرم معادله ۴ و حل آن با استفاده از روش انتگرال گیری گام به گام یا روش جمع آثار قوا بردارهای شتاب، سرعت و جابه جایی در زمان های مختلف محاسبه می شود. روش جمع آثار قوا، فقط برای سیستم های خطی کاربرد دارد. اما روش انتگرال گیری گام به گام برای سیستم های خطی و غیرخطی استفاده

تغییر شکل شمع تحت اثر بارگذاری لرزه ای، که توسط روش وینکلر مدل سازی شده است، را نشان می دهد.

در روش وینکلر جهت تعیین جابه جایی شمع از معادله تعادل دینامیکی به صورت رابطه ۱ استفاده می شود:

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{R(t)\} \quad (1)$$

که در آن، $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ به ترتیب ماتریس های جرم، میرایی و سختی کل سیستم هستند که مقدار آن ها از به هم پیوستن ماتریس های مربوط به المان های تشکیل دهنده سیستم به دست می آید. پارامترهای $\{\ddot{u}\}$ ، $\{\dot{u}\}$ و $\{u\}$ به ترتیب بردارهای شتاب، سرعت و جابه جایی هستند. $\{R(t)\}$ بار دینامیکی است و به صورت رابطه ۲ تعریف می شود:

$$R(t) = -MI\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

که در آن، $\ddot{u}_g(t)$ شتاب ورودی زلزله از زمین در محل فصل مشترک و I بردار واحدی است که نیروی زلزله را به درجه های آزادی سیستم وارد می کند. با استفاده از معادله موج در یک بعد، معادله دیفرانسیل حاکم بر حرکت شمع در هنگام وارد شدن نیروی زلزله در جهت افقی به صورت رابطه ۳ به دست می آید:

$$EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \rho A \left(\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 v_g}{\partial t^2} \right) + c \left(\frac{\partial v}{\partial t} - \frac{\partial v_{ff}}{\partial t} \right) + K_h(v - v_{ff}) = 0 \quad (3)$$

که در آن، E مدول یانگ شمع، A سطح مقطع شمع، I لنگر دوم اینرسی شمع، v_{ff} جابه جایی نسبی میدان آزاد براساس تحریک پایه، ρ چگالی شمع، K_h ضریب عکس العمل خاک، c ضریب میرایی معادل، v جابه جایی نسبی شمع با توجه به تحریک پایه، v_g تحریک پایه و EI نشان دهنده سختی شمع هستند. با ساده سازی معادله ۳ و قراردادی ترم های نیرو در سمت راست معادله، رابطه ۴ حاصل می شود.^[۲۲]

$$\rho A \frac{\partial^4 v}{\partial t^4} + c \frac{\partial v}{\partial t} + \left(EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + K_h v \right) = \left(\rho A \frac{\partial^2 v_g}{\partial t^2} + c \frac{\partial v_{ff}}{\partial t} + K_h v_{ff} \right) \quad (4)$$

مقایسه معادله ۴ با معادله ۱ نشان می دهد از آنجا که حل معادله ۱ با استفاده از ماتریس های جرم، میرایی و سختی انجام گرفته است، بنابراین برای حل معادله ۴ نیز نیاز به ماتریس های بیان شده در معادله ۱ است. در ادامه، نحوه محاسبه ماتریس های جرم، میرایی و سختی خاک، شمع و سیستم شمع - خاک ارائه شده است.

ماتریس سختی المان های شمع به صورت رابطه ۵ تعریف می شود که در آن L طول المان شمع است.^[۲۲]

$$K^p = EI \int_0^L N_i^n N_j^n dx = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & 6L & 2L^2 \\ -12 & 6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

می‌شود. [۲۳] پس از اعمال اثر نیروی زلزله و شرایط مرزی، معادله‌ی دینامیکی سیستم با استفاده از روش انتگرال‌گیری عددی نیومارک قابل حل است که گام‌های آن در ادامه ارائه شده است:

$$۱. تعیین مقدار اولیه‌ی $\ddot{u}_0, \dot{u}_0, u_0$;$$

۲. انتخاب گام زمانی Δt ، به طوری که α و β و ضرایب ثابت انتگرال‌گیری به صورت رابطه‌ی ۱۰ محاسبه شوند:

$$\begin{cases} \beta \geq 0.5 \\ \alpha \geq 0.25(0.5 + \beta)^2 \\ a_0 = 1/\alpha \Delta t^2 \\ a_1 = \beta/\alpha \Delta t \\ a_2 = 1/\alpha \Delta t \\ a_3 = 1/2\alpha - 1 \\ a_4 = \beta/\alpha - 1 \\ a_5 = \Delta t/2(\beta/\alpha - 2) \\ a_6 = \Delta t(1 - \beta) \\ a_7 = \beta \Delta t \end{cases} \quad (۱۰)$$

۳. تعیین ماتریس مؤثر \hat{K} از رابطه‌ی ۱۱:

$$\hat{K} = K + a_0 M + a_1 C \quad (۱۱)$$

۴. محاسبه‌ی بار مؤثر در زمان $t + \Delta t$ به صورت رابطه‌ی ۱۲:

$$\begin{aligned} \hat{R}_{t+\Delta t} = & R_{t+\Delta t} + M(a_0 u_t + a_1 \dot{u}_t + a_2 \ddot{u}_t) \\ & + C(a_3 u_t + a_4 \dot{u}_t + a_5 \ddot{u}_t) \end{aligned} \quad (۱۲)$$

۵. تعیین تغییرمکان‌ها در زمان $t + \Delta t$ ؛

۶. محاسبه‌ی شتاب‌ها و سرعت‌ها در زمان $t + \Delta t$ (روابط ۱۳ و ۱۴):

$$\ddot{u}_{t+\Delta t} = a_0(u_{t+\Delta t} - u_t) + a_1 \dot{u}_t + a_2 \ddot{u}_t \quad (۱۳)$$

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_t + a_6 \ddot{u}_t + a_7 \ddot{u}_{t+\Delta t} \quad (۱۴)$$

۳. آنالیز غیرقطعی

روش‌های آنالیز قابلیت اطمینان به‌عنوان روش‌های مبتنی بر علم احتمالات، ابزارهای کارآمدی جهت اعمال عدم قطعیت در پارامترهای مختلف، برای حل مسئله هستند. به‌طورکلی روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان را می‌توان به ۵ دسته تقسیم کرد: روش‌های تحلیلی، مانند: روش ترکیب منحنی تابع توزیع متغیرهای تصادفی، روش‌های تقریبی مانند روش قابلیت اطمینان مرتبه‌ی اول، روش لنگر دوم مرتبه‌ی اول و روش تخمین نقطه و روش‌های عددی، مانند: روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو و روش نمونه‌گیری لاتین هاپرکیوب، روش‌های مبتنی بر رگرسیون آماری، روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی. در پژوهش حاضر از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شده است.

۱.۳. روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو

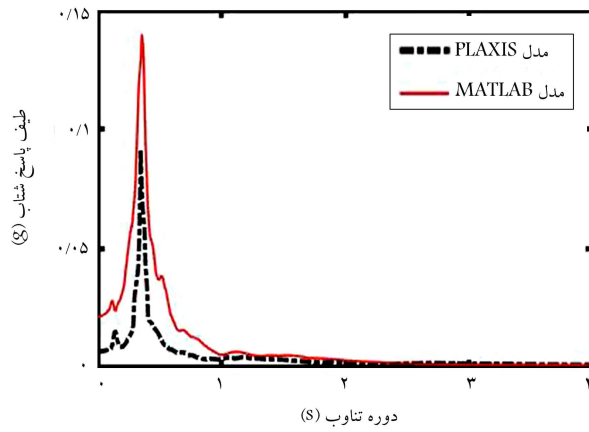
امروزه جهت حل مسائل زیادی از علوم مهندسی و اقتصاد، از روش عددی شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده می‌شود. روش مونت‌کارلو الگوریتمی محاسباتی است که برای محاسبه‌ی نتایج از نمونه‌گیری تصادفی تکرارشونده استفاده می‌کند. روش مونت‌کارلو، نوعی شبیه‌سازی است که عدم قطعیت در ابعاد مختلف مسئله را به صورت واضح وارد می‌کند. به دلیل انکاء روش مونت‌کارلو بر محاسبات تکراری و اعداد تصادفی یا تصادفی کاذب، روش‌های مذکور اغلب به گونه‌ی تنظیم می‌شوند که توسط رایانه اجرا شوند. روش‌های شبیه‌سازی مونت‌کارلو مخصوصاً در مطالعه‌ی سیستم‌هایی که در آن تعداد زیادی متغیر با درجه آزادی‌های دو به دو مرتبط وجود دارد، مفید است. روش‌های مونت‌کارلو برای شبیه‌سازی پدیده‌هایی که عدم قطعیت زیادی در ورودی‌های آن‌ها وجود دارد، نیز مفید هستند. در روش مونت‌کارلو کل سیستم به دفعات شبیه‌سازی می‌شود، به طوری که تمام شبیه‌سازی‌ها، شانس وقوع یکسانی دارند. در روش مونت‌کارلو، جهت تعیین کمی عدم قطعیت‌های مدل برای هر یک از متغیرهای تصادفی ورودی، یک تابع توزیع احتمال در نظر گرفته می‌شود. در هر مرتبه شبیه‌سازی برای هر متغیر ورودی، یک متغیر تصادفی با توجه به ویژگی‌های تابع توزیعی که برای آن متغیر در نظر گرفته شده است، انتخاب می‌شود و با جای‌گذاری در تابع هدف، مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود. این فرایند آنقدر تکرار می‌شود تا به تعداد کافی متغیر خروجی برای ساخت منحنی توزیع احتمال تابع هدف تولید شود. تعداد سعی لازم برای مسائل با متغیرهای تصادفی ورودی با تابع توزیع نرمال را می‌توان از طریق رابطه‌ی ۱۵ تقریب زد: [۲۴]

$$N = \left[\frac{d^2}{4(1-\varepsilon)^2} \right]^n \quad (۱۵)$$

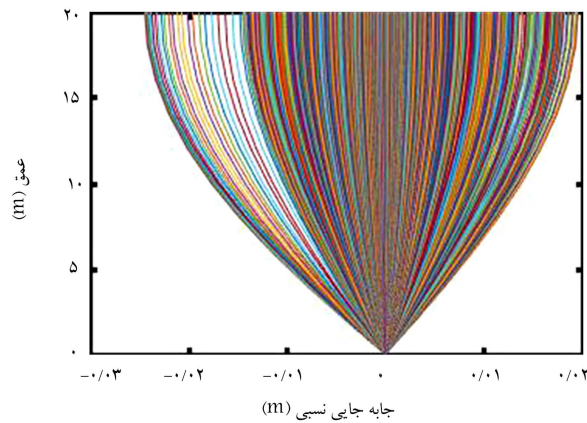
که در آن، N تعداد سعی مونت‌کارلو لازم، d تعداد انحراف استاندارد در نظر گرفته شده در طرفین میانگین تابع توزیع نرمال براساس درصد n تعداد متغیرهای تصادفی ورودی است.

۴. مدل‌سازی یک مثال نمونه

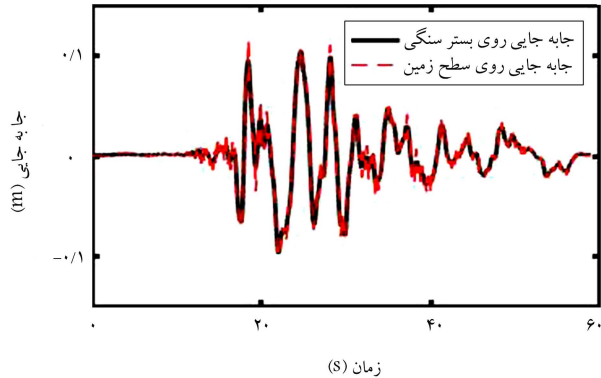
جهت تعیین کارایی روش موردنظر، با استفاده از معادله‌ی ۴ و پارامترهای تعریف شده در آن، نسبت به مدل‌سازی یک شعاع در خاک مبتنی بر روش وینکلر اقدام شده است. برای این منظور با برنامه‌نویسی در محیط متلب، مسئله در دو حالت قطعی و غیرقطعی حل شده و جهت صحت‌سنجی مسئله در حالت قطعی با داده‌های میانگین با نتایج نرم‌افزار پلاکسیس مقایسه شده است. در مدل‌سازی اخیر، از شعاعی به طول ۱۰/۰ متر که به المان‌های ۱ متری تقسیم شده، استفاده شده است. جهت حل مدل، ابتدا پاسخ سایت تعیین و نتایج به آنالیز سیستم شعاع - خاک وارد شده است. به منظور لحاظ آثار سطح تماس شعاع و خاک، از فنر و میراگر استفاده شده است، که نشان‌دهنده‌ی اتلاف انرژی و سختی خاک هستند. برای اثر دادن محدوده‌ی از خاک که در فاصله‌ی بیشتری از شعاع قرار دارد، از آنالیز پاسخ ساختمان استفاده شده است. بار دینامیکی به فرم اختیاری زلزله‌ی چی ۴ انتخاب شده است که پس از وارد کردن آن بر بستر سنگی، اثر آن به مدل وارد و معادله‌ی حرکت به روش نیومارک حل شده و مقادیر جابه‌جایی نسبی، سرعت نسبی و شتاب نسبی در طول شعاع محاسبه شده است. مشخصات شعاع و خاک و زلزله‌ی اعمال شده بر بستر صلب در تحلیل حاضر به ترتیب در جدول‌های ۱ الی



شکل ۳. مقایسه‌ی طیف پاسخ شتاب مدل ارائه شده و PLAXIS.



شکل ۴. تغییرات جابه‌جایی نسبی خاک در عمق.



شکل ۵. مقایسه‌ی جابه‌جایی نداشت زلزله‌ی ورودی و سطح زمین.

داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی، انطباق قابل قبولی با نتایج به‌دست آمده از پلاکسیس که مبنی بر مدل‌سازی بر روش اجزاء محدود است، دارد.

در شکل ۵، پاسخ جابه‌جایی زمین در گام‌های زمانی زلزله در طول خاک مشاهده می‌شود که مطابق آن با رسیدن به سطح زمین، مقدار جابه‌جایی ناشی از زلزله افزایش یافته است. در ادامه، مقایسه‌ی بین جابه‌جایی نداشت و شتاب‌نگاشت زلزله‌ی ورودی در بستر و جابه‌جایی نداشت و شتاب‌نگاشت خاک در سطح زمین به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که مطابق آن‌ها، مقدار شتاب و جابه‌جایی در سطح، مقداری افزایش یافته است. در جدول ۴، مقایسه‌ی بین بیشینه‌ی

جدول ۱. مشخصات لایه‌های خاک.

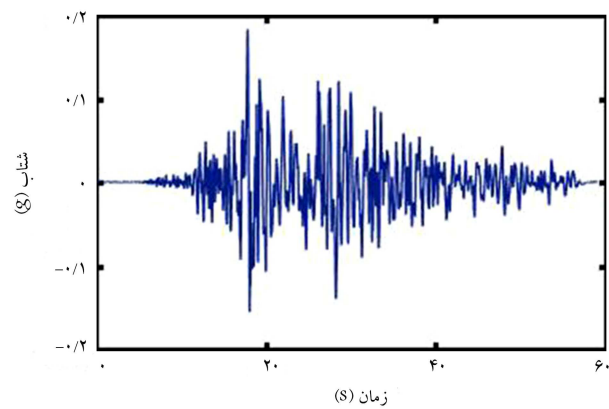
ضریب پواسون	مدول کشسانی (Pa)	وزن مخصوص (KN/m^3)
۰٫۳	۳۵۰۰۰٫۰	۱۸٫۰

جدول ۲. مشخصات شمع مورد استفاده در مدل‌سازی.

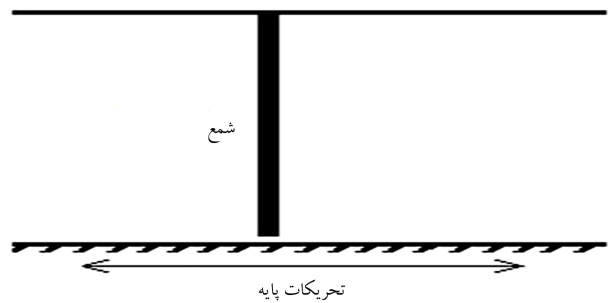
شمع	طول (m)	قطر (m)	مدول کشسانی (Pa)	وزن مخصوص (KN/m^3)

جدول ۳. مشخصات زلزله‌ی چی چی به‌عنوان بار دینامیکی جانبی در مدل‌سازی.

زلزله	بیشینه‌ی شتاب (PGA) (g)	مدت زمان رخداد زلزله (s)	فاصله‌ی زمانی
چی چی	۰٫۱۸۲۷	۵۸٫۹۹۵	۰٫۰۰۵



شکل ۲. شتاب نداشت زلزله‌ی چی چی.

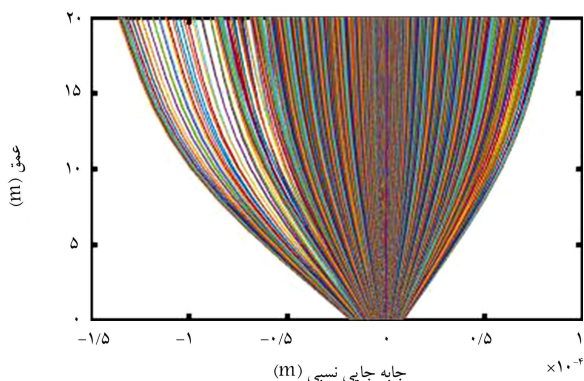


شکل ۳. مدل‌سازی شمع در محیط متلب.

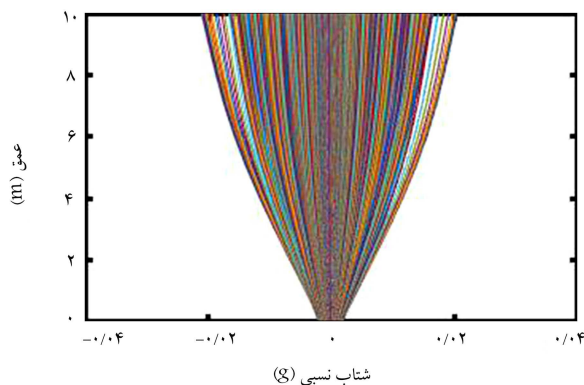
ارائه شده است. در شکل ۲، شتاب‌نگاشت زلزله‌ی چی چی و شکل ۳، نمای کلی از مدل‌سازی شمع در محیط متلب مشاهده می‌شود که مطابق آن انتهای شمع در بستر صلب قرار نگرفته و نوک شمع، ۰٫۵ متر با بستر صلب فاصله داده شده است.

۱.۴. صحت‌سنجی مدل

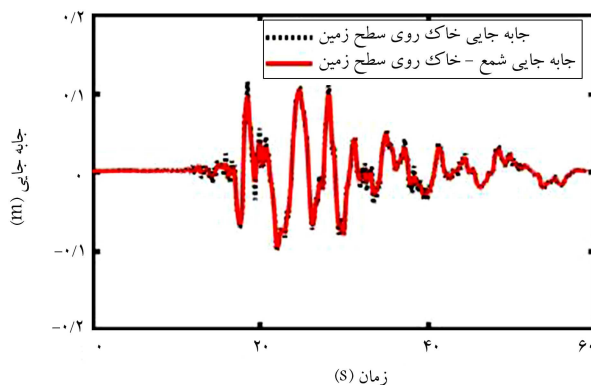
از آنجا که در مدل نیاز به نتایج عکس‌العمل ساختگاه بوده است، لذا جهت صحت‌سنجی مدل در حالت قطعی، ابتدا نتایج آنالیز پاسخ ساختگاه مقایسه شده است. در شکل ۴، مقایسه‌ی بین طیف پاسخ حاصل از مدل‌سازی و پلاکسیس نمایش



شکل ۹. تغییرات جابه‌جایی نسبی شمع - خاک در عمق.



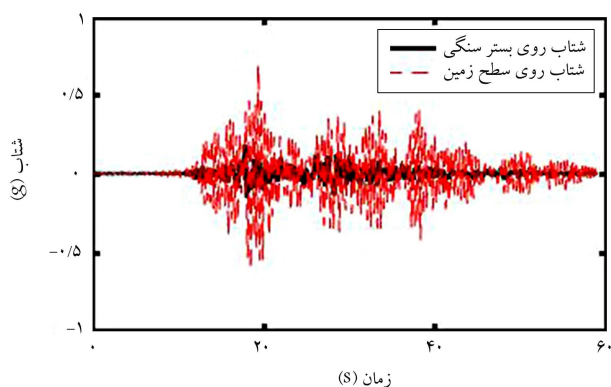
شکل ۱۰. شتاب نسبی شمع - خاک تحت اثر زلزله‌ی چی چی.



شکل ۱۱. مقایسه‌ی جابه‌جایی کل سیستم شمع - خاک.

۵. آنالیز غیرقطعی

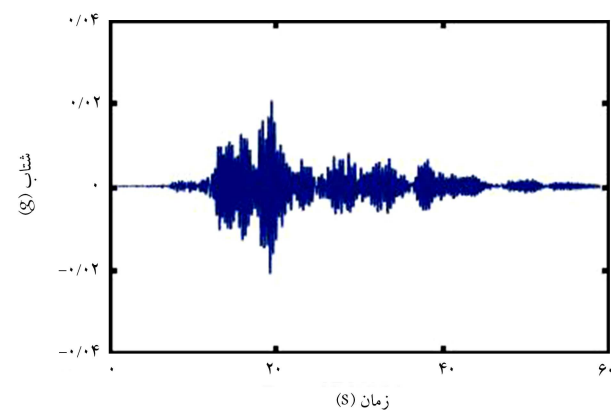
پس از انجام آنالیز قطعی، جهت انجام آنالیز غیرقطعی از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شده است. مشخصات خاک، شمع و زلزله‌ی مورد استفاده به منظور انجام آنالیز غیرقطعی مشابه با حالت آنالیز قطعی است. در ادامه، خروجی‌های حاصل از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو بر روی سیستم شمع - خاک برای محاسبه‌ی بیشینه‌ی جابه‌جایی شمع تحت اثر زلزله ارائه شده است. به این منظور از یک نمونه خاک جهت بررسی تحلیل تصادفی استفاده شده است که اطلاعات ژئوتکنیکی آن در جدول ۵ ارائه شده است. برای احتمالاتی کردن مسئله از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو با ۶۰۰۰۰ تکرار استفاده شده است. پارامترهای تصادفی در نظر گرفته شده‌ی جرم مخصوص خاک،



شکل ۷. مقایسه‌ی شتاب‌نگاشت زلزله‌ی ورودی و شتاب‌نگاشت سطح زمین.

جدول ۴. مقادیر بیشینه‌ی جابه‌جایی، سرعت و شتاب.

موقعیت	بیشینه‌ی		
	جابه‌جایی (cm)	سرعت (cm/s)	شتاب (g)
سطح زمین	۰٫۱۱۷۷	۰٫۶۸۰۶۱	۰٫۶۸۴۳
بستر	۰٫۱۰۳۷۷	۰٫۳۹۲۹	۰٫۱۸۳



شکل ۸. شتاب‌نگاشت زلزله Chi Chi.

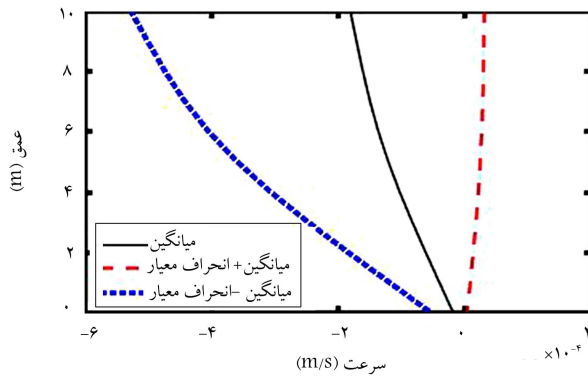
جابه‌جایی، سرعت و شتاب در سطح زمین و شتاب وارد شده به بستر صلب انجام شده است که مطابق آن بیشینه‌ی جابه‌جایی، سرعت و شتاب در سطح زمین افزایش یافته است.

۲.۴. نتایج آنالیز قطعی مدل شمع - خاک

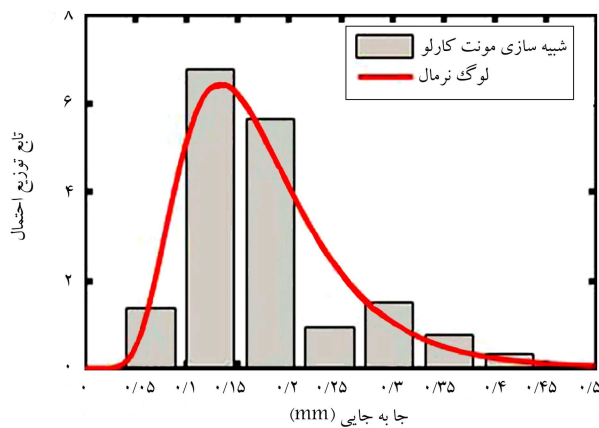
در بخش حاضر، به بررسی نتایج حاصل از آنالیز قطعی مدل شمع - خاک پرداخته شده است. در شکل ۸، شتاب‌نگاشت حاصل از تحلیل شمع - خاک در سطح زمین مشاهده می‌شود. در آنالیز پاسخ ساختگاه، مطابق شکل ۷ مقدار شتاب با رسیدن به سطح زمین افزایش قابل توجهی یافته است. این در حالی است که به دلیل استفاده از شمع در ساختگاه، مقدار شتاب در سطح زمین کاهش یافته است. در شکل‌های ۹ و ۱۰، مقادیر جابه‌جایی نسبی و شتاب نسبی سیستم شمع - خاک تحت اثر زلزله برای عمق‌های مختلف مشاهده می‌شود. در ادامه، مقایسه‌ی بین جابه‌جایی نسبی در سطح زمین برای خاک و جابه‌جایی نسبی در سطح زمین برای سیستم شمع - خاک انجام شده است (شکل ۱۱).

جدول ۵. مقادیر پارامترهای غیرقطعی با توزیع لوگ نرمال.

مقدار		انحراف معیار	میانگین	
پیشینه	کمینه			
۳۸۵۰۰۰۰۰۰۰	۱۵۵۰۰۰۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰۰۰۰۰	مدول کشسانی شمع (Pa)
۱۲۵۰۰۰۰۰۰	۸۸۰۰۰۰۰۰	۸۷۵۰۰۰۰۰	۳۵۰۰۰۰۰۰۰	مدول کشسانی خاک (Pa)
۱۳۵۰	۲۳۹۳	۱۲۶	۱۸۰۰	جرم مخصوص خاک (kg/m^3)



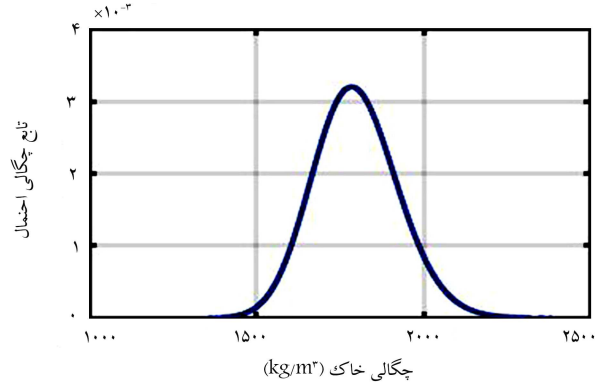
شکل ۱۵. مقایسه‌ی میانگین سرعت سیستم شمع - خاک با سرعت میانگین به علاوه و منهای انحراف معیار.



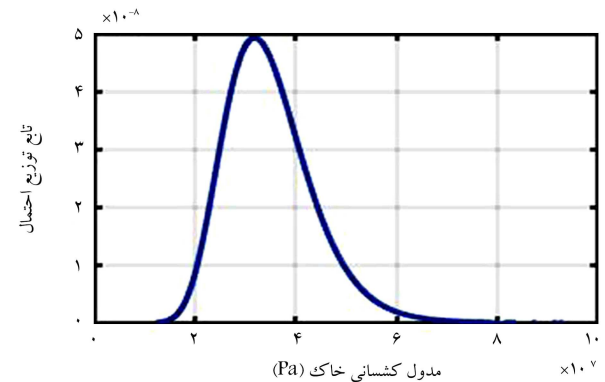
شکل ۱۶. تابع چگالی احتمال پیشینه‌ی جابه‌جایی سر شمع در ثانیه‌ی سی‌ام زلزله.

می‌شود که مطابق آن با تغییر داده‌های ورودی به اندازه‌ی یک انحراف معیار، سرعت نسبی در سر شمع در یک زمان انتخابی از زلزله از مقدار 0.103 میلی‌متر بر ثانیه تا مقادیر 0.527 میلی‌متر بر ثانیه و 0.321 میلی‌متر بر ثانیه تغییر پیدا کرده است. با حل احتمالاتی معادله‌ی حرکت، به ترتیبی که پیش از این توضیح داده شد، جابه‌جایی در هر نقطه‌ی شمع به صورت احتمالاتی به دست می‌آید. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، به ترتیب تابع چگالی احتمال و تابع توزیع تجمعی مربوط به پیشینه‌ی جابه‌جایی شمع (سر شمع) تحت اثر زلزله‌ی چی چی مربوط به ثانیه‌ی سی‌ام مشاهده می‌شود.

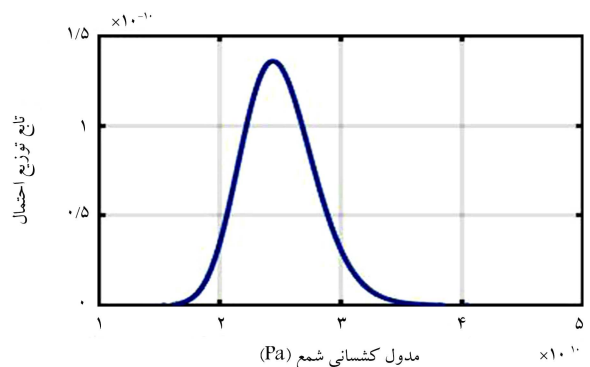
همچنین جهت بررسی احتمالاتی اثر طول شمع، مدل‌سازی برای ۳ طول مختلف شمع انجام شده است. برای این منظور، ۳ شمع با طول‌های 1.0 ، 1.5 و 2.0 متر مدل و تابع چگالی آن‌ها تعیین شده است. در شکل ۱۸، نتیجه‌ی مدل‌سازی‌های اخیر مشاهده می‌شود که مطابق آن با افزایش طول شمع برای یک احتمال ثابت، جابه‌جایی افزایش یافته است.



شکل ۱۷. توزیع تغییرات چگالی خاک.



شکل ۱۸. توزیع تغییرات مدول کشسانی خاک.



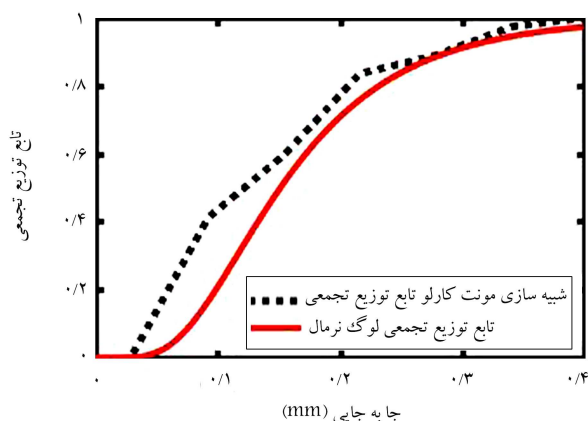
شکل ۱۹. توزیع تغییرات مدول کشسانی شمع.

مدول کشسانی خاک و مدول کشسانی بتن است که برای آن‌ها از تابع توزیع لوگ نرمال استفاده شده است. در شکل‌های ۱۲ الی ۱۴، توزیع پارامترهای غیرقطعی ذکر شده مشاهده می‌شود. به عنوان اولین نتیجه، مقایسه‌ی بین میانگین سرعت شمع و میانگین به علاوه‌ی انحراف معیار و میانگین، منهای انحراف در طول شمع در شکل ۱۵ مشاهده

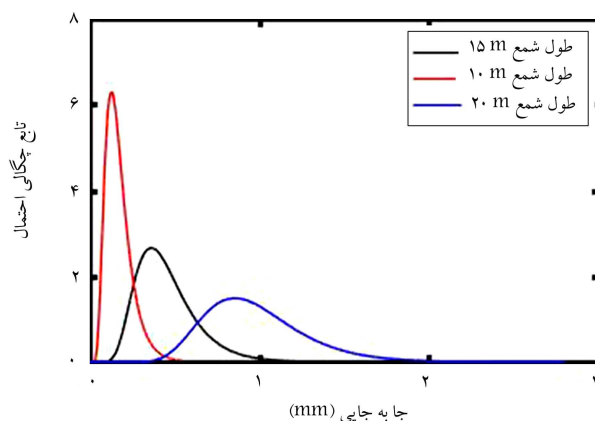
۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از روش وینکлер و با لحاظ عدم قطعیت در مدول کشسانی شمع، خاک و چگالی خاک به بررسی جابه‌جایی شمع تحت اثر بار زلزله پرداخته شده است. به این منظور، دو برنامه برای حالت قطعی و غیرقطعی در محیط برنامه‌نویسی متلب کدنویسی شده است. در نهایت، جهت انجام تحلیل تصادفی از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شده است. برای وارد کردن زلزله‌ی منتخب، زلزله بر بستر سنگی اعمال و اثر آن از طریق یک آنالیز پاسخ ساختگاه وارد معادله‌ی حرکت شده است.

نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان می‌دهد که شتاب ورودی هنگام عبور از لایه‌های خاک تقویت می‌شود و در صورت استفاده از شمع در خاک، به واسطه‌ی متناسب با میزان سختی آن، مقدار جابه‌جایی نسبی در سطح زمین به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. با وارد کردن احتمالاتی داده‌های ورودی، جابه‌جایی، سرعت نسبی، و شتاب شمع در زمان‌های مختلف رخداد زلزله، توزیع احتمالاتی خواهند داشت. نمونه‌ی از تغییرات سرعت سر شمع در خاک در پژوهش حاضر ترسیم شده است. این نمودار نشان می‌دهد وقتی داده‌های ورودی به اندازه‌ی یک انحراف معیار تغییر داده می‌شوند، سرعت در سر شمع از مقدار ۰.۱۰۳ میلی‌متر بر ثانیه تا ۰.۵۲۷ میلی‌متر بر ثانیه و ۰.۳۲۱ میلی‌متر بر ثانیه تغییر می‌کند. در بخش دیگری از نوشتار حاضر نسبت به تعیین منحنی توزیع احتمالاتی سر شمع اقدام شده است، که از طریق آن می‌توان احتمال تغییرات جابه‌جایی سر شمع را به دست آورد. لازم به ذکر است منحنی مذکور فقط برای یک زمان خاص از مدت زمان رخداد زلزله است. جهت بررسی اثر طول شمع در احتمال تغییر شکل آن با ۳ طول مختلف، معادله‌ی حرکت به روش احتمالاتی حل شده است. نتیجه‌ی بررسی کنونی نشان می‌دهد با افزایش طول شمع، میانگین جابه‌جایی سر شمع افزایش پیدا می‌کند و انحراف معیار جابه‌جایی سر شمع نیز افزایش می‌یابد و یا به عبارتی محدوده‌ی تغییرات شمع دچار افزایش می‌شود.



شکل ۱۷. تابع توزیع تجمعی مربوط به بیشینه‌ی جابه‌جایی سر شمع در ثانیه‌ی سی‌ام زلزله.



شکل ۱۸. مقایسه‌ی تابع چگالی احتمال بیشینه‌ی جابه‌جایی سر شمع برای طول‌های مختلف شمع.

پانویس‌ها

1. Monte Carlo simulation
2. Matlab
3. Plaxis
4. Chi Chi

منابع (References)

1. Vesic, A.B. "Bending of beams resting on isotropic elastic solid", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, **87**(2), pp. 35-54 (1961).
2. Novak, M. "Dynamic stiffness and damping of piles", *Canadian Geotechnical Journal*, **11**(4), pp. 574-598 (1974).
3. Tajimi, H. "Earthquake response of foundation structures", Report of the Faculty of Science and Engineering, Nihon University, pp. 11-35 (1966).
4. Nogami, T. and Novak, M. "Coefficients of soil reaction to pile vibration", *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, **106**(5), pp. 565-570 (1980).
5. Berger, E., Mahi, S.A. and Pyke, R. "Simplified method for evaluating soil-pile-structure interaction effects", *Off-shore Technology Conference* (1977).
6. Wang, S., Kutter, B.L. and Chacko, M.J. "Nonlinear seismic soil-pile structure interaction", *Earthquake Spectra*, **14**(2), pp. 377-396 (1998).
7. Novak, M., Aboul-Ella, F. and Nogami, T. "Dynamic soil reactions for plane strain case", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, **104**(4), pp. 953-959 (1978).
8. Matlock, H. and Foo, S.H. "Simulation of lateral pile behavior under earthquake motion", In From Volume I of Earthquake Engineering and Soil Dynamics-Proceedings

- of the ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference, Pasadena, California. Sponsored by Geotechnical Engineering Division, pp. 600-619 (June 19-21, 1978).
9. PoLam, I., Kapuskar, M. and Chaudhuri, D. "Modeling of pile footings and drilled shafts for seismic design", Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (1998).
 10. Hutchinson, T.C., Chai, Y., Boulanger, R. and et al. "Inelastic seismic response of extended pile-shaft-supported bridge structures", *Chai*, **20**(4), pp. 1057-1080 (2004).
 11. Kagawa, T. and Kraft, L.M. "Lateral load-for bridges", Doctoral Dissertation, University of British Columbia (2000).
 12. Badoni, D. and Makris, N. "Nonlinear response of single piles under lateral inertial and seismic loads", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **15**(1), pp. 29-43 (1996).
 13. Gazetas, G. and Obry, B. "Horizontal response of piles in layered soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, **110**(1), pp. 20-40 (1984).
 14. Gazetas, G. and Dobry, R. "Simple radiation damping model for piles and footings", *Journal of Engineering Mechanics*, **110**(6), pp. 937-956 (1984).
 15. Bentley, K.J. and Naggar, M.H.E. "Numerical analysis of kinematic response of single piles", *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(6), pp. 1368-1382 (2000).
 16. Parmelee, R., Penzien, J., Scheffey, C. and et al. "Seismic effects on structures supported on piles extending through deep sensitive clays", Report, No. 64-2, Inst. of Eng. Res., Univ. of California (Berkeley), California (1964).
 17. Randolph, M.F. "The response of flexible piles to lateral loading", *Geotechnique*, **31**(2), pp. 247-259 (1981).
 18. Faruque, M. and Desai, C. "3-D material and geometric nonlinear analysis of piles", In *Proceedings of the Second International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling*, pp. 553-575 (1982).
 19. Trochanis, A.M., Bielak, J. and Christiano, P. "Simplified model for analysis of one or two piles", *Journal of Geotechnical Engineering*, **117**(3), pp. 448-466 (1991).
 20. Wu, G. and Finn, W.L. "Dynamic nonlinear analysis of pile foundations using finite element method in the time domain", *Canadian Geotechnical Journal*, **34**(1), pp. 44-52 (1997).
 21. Okada, T., Fujita, K. and Takewaki, I. "Robustness evaluation of seismic pile response considering uncertainty mechanism of soil properties", Innovative Infrastructure Solutions (2016).
 22. Chang, D.W., Lin, Y.H., Liu, C.H. and et al. "Seismic performance of piles from EQWEAP and monte carlo simulation analyses", In *Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfalls*, pp. 375-384, Springer, Tokyo (2017).
 23. Thavaraj, T. "Seismic analysis of pile foundations deflection relationships of piles subjected to dynamic loadings", *Soils and Foundations*, **20**(4), pp. 19-36 (1980).
 24. William, C., Diederich, F. and Philip, S.P.J. "Structural optimization and design based on a reliability design criterion", *J. SPACECRAFT*, **1**(1), pp. 56-61 (1964).