

کنترل فعال سازه‌ها به روش تخصیص قطب‌ها با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک سازه

فریدون امینی

استاد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

famine@iust.ac.ir

فرزانه مدیری

کارشناس ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

farzane_modiri@yahoo.com

احسان درویشان

دکتر، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

darvishan@iust.ac.ir

کلید واژه‌ها: اندرکنش خاک- سازه، کنترل فعال سازه‌ها، روش تخصیص قطب‌ها، مدل دو درجه آزادی خاک- سازه، سرعت موج برشی خاک

چکیده

در این مقاله اثر اندرکنش خاک- سازه در روند کنترل فعال سازه‌ها به روش تخصیص قطب‌ها بررسی می‌شود. به منظور ارزیابی اثر اندرکنش خاک در روند کنترل ابتدا نتایج پاسخ‌های دینامیکی کنترل شده و کنترل نشده برای سیستم سازه‌ای معمول بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک- سازه مقایسه می‌گردند. در ادامه اثر اندرکنش خاک با به کارگیری مدل مناسب برای سیستم خاک سازه در محاسبات کنترلی سازه وارد شده و نیروی کنترل مناسب جهت اعمال به سازه از طریق الگوریتم تخصیص قطب‌ها محاسبه می‌شود. مدل دو درجه آزادی برای سیستم خاک- سازه به‌عنوان مثال عددی معرفی می‌شود و از آنجاییکه سرعت موج برشی خاک معرف شرایط خاک می‌باشد، به منظور تحقیق درباره اثر شرایط خاک از لحاظ نرمی و سختی در روند کنترل سیستم خاک- سازه، سرعت موج برشی متغیر در نظر گرفته می‌شود. این بار نیز با مقایسه پاسخ‌های دینامیکی کنترل شده و کنترل نشده سیستم خاک- سازه اثر روش کنترل در کاهش پاسخ‌های دینامیکی سیستم خاک- سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج عددی گویای آن است که اثر اندرکنش خاک تغییراتی را در روند کنترلی سیستم به دنبال خواهد داشت و به خصوص در مورد خاک نرم اثر اندرکنش خاک منجر به عملکرد ضعیف سیستم کنترلی می‌شود. بنابراین با نادیده گرفتن اثر اندرکنش خاک- سازه و گیردار فرض نمودن انتهای سازه بروز اختلالاتی در ارزیابی عملکرد واقعی سیستم کنترلی غیرقابل اجتناب است. این ضعف سیستم کنترلی خصوصاً در شرایطی که خاک زیر سازه نرم باشد، مشهودتر می‌باشد.

مقدمه

در هنگام بروز زلزله شرایط تکیه گاهی سازه تاثیر قابل توجهی در رفتار لرزه‌ای آن خواهد داشت. اثر اندرکنش خاک سازه منجر به بروز تغییراتی در قابلیت انعطاف‌پذیری و مقاومت سیستم سازه‌ای می‌شود (Ghannad and Ahmarinia, 2006). با توجه به اهمیت اثر خاک زیرین سازه در رفتار دینامیکی سازه، محققین بسیاری به تحقیق درباره اثر اندرکنش خاک بر روی پاسخ الاستیک و پلاستیک سیستم دینامیکی ارتعاش پرداخته‌اند (Novak, 1974; Veletsos, 1977; Rodriguez and Montes, 2000; Aviles and Perez-Rocha, 2003). به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر سیستم خاک سازه نسبت به سیستم سازه‌ای با انتهای گیردار، سیستم خاک سازه معمولاً تغییر شکل‌های دینامیکی بیشتری را در هنگام بروز بارهای دینامیکی تجربه می‌کند. بنابراین بحث کنترل سازه که هدف از آن کاهش پاسخ‌های دینامیکی سیستم است، در مورد سیستم اندرکنش خاک سازه از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. در مطالعات کنترل به منظور ایده آل سازی سیستم، انتهای سازه گیردار فرض شده و از اثر اندرکنش خاک صرف‌نظر می‌شود. در حالیکه تعداد زیادی از سازه‌ها روی خاک نرم احداث میشوند که اثر اندرکنش خاک در رفتار دینامیکی آنها



غیر قابل اغماض می‌باشد. از آنجاییکه ورودی‌های سیستم کنترلی تابعی از خصوصیات دینامیکی سازه است (Wu et al., 2001)، اثر اندرکنش خاک تغییراتی را در طرح کنترل پدید خواهد آورد. در سال‌های اخیر بخش قابل ملاحظه‌ای از مطالعات کنترل به بررسی اثر اندرکنش خاک در روند کنترل اختصاص یافته است.

اسمیت و ویو (Smith and Wu, 1997) به بررسی اثر اندرکنش خاک در کنترل بهینه سازه پرداختند و یک ساختمان برشی ۵ طبقه را با سیستم اندرکنش خاک به عنوان مثال عددی در نظر گرفته و نیروی کنترل محاسبه شده را در سقف سازه اعمال نمودند. نتایج عددی نمایانگر آن است که الگوریتم کنترل برای سیستم خاک سازه با خاک نرم موثرتر از سیستم با انتهای گیردار است.

شن و منظری (Shen and Manzari, 2002) روش کنترل LQG را در حوزه زمان برای کنترل لرزه ای سازه با اثر اندرکنش خاک به کار بردند. آنها یک مدل تقریبی وابسته به فرکانس با پارامترهای متمرکز به کار گرفتند.

ژانگ و همکارانش در سال ۲۰۰۶ (Zhang et al., 2006) یک روش کنترل هوشمند برای سیستم کنترل ترکیبی میراگر و بادبند طراحی نموده و میزان تاثیر اندرکنش خاک-سازه را در روند کنترل ارزیابی کردند. نتایج عددی مطالعات آنها نشان داد که بایستی اثر اندرکنش خاک در سیستم های کنترل ترکیبی به خصوص برای خاک نرم در نظر گرفته شود.

امینی و شادلو در سال ۲۰۱۱ (Amini and Shadlou, 2011) اثر فرورفتگی فونداسیون را در کنترل سازه وارد کردند و با انتخاب ۴۸ مدل و ۳ رکورد زلزله گستره وسیعی از اثرات اندرکنش را در مطالعات خود منظور نمودند. آنها فرض نمودند که وسایل کنترل نیمه فعال روی تمام طبقات نصب شده است. نتایج عددی نشان دادند که وارد کردن اثر اندرکنش در کنترل سازه منجر به آسیب های غیر قابل انتظاری می شود. بنابراین در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک در کنترل سازه هایی که توسط وسایل کنترل فعال یا نیمه فعال کنترل می شوند بسیار مهم است.

در این مقاله یکی از متداولترین و قدیمی ترین الگوریتمهای کنترل به نام روش تخصیص قطب ها به منظور کنترل سازه های در معرض زلزله به کار گرفته می شود. الگوریتم تخصیص قطبها به طور گسترده ای در ادبیات عمومی مهندسی کنترل بررسی شده است (Sage and White, 1977; Brogan, 1974; Ogata, 1997). در واقع روش تخصیص قطب ها یکی از روشهایی است که از دیرباز به طور گسترده ای در مهندسی برق و کنترل به کار گرفته شده و سپس به منظور کنترل فعال سازه ها توجه محققین رشته مهندسی سازه را به خود جلب نموده است و توسط افرادی چون (Soong, 1990; Amini et al., 1983; Amini, 1995; Amini, 1996; Meirovotch, 1990; Martin and Soong, 1976; Utku, 1998) مورد تحقیق قرار گرفته است.

در کنترل سازه ها به روش تخصیص قطب ها ، قطب ها عبارتند از مقادیر ویژه ماتریس سیستم . برای سیستمهای سازه ای این مقادیر ویژه به صورت زوج های مختلطی می باشند که مشخصات میرایی و فرکانس سازه در آنها مستتر می باشند. در این روش اختصاص قطب های مناسب به منظور کنترل سازه امری ضروری می باشد (Leipholz, 1986; Abdel-Rohman and Reipholz, 1978). با وارد کردن اثر اندرکنش خاک در سازه به دلیل تغییر در تابع پاسخ فرکانس و پارامترهای مودی ، موقعیت قطب های سازه نیز دستخوش تغییر خواهد شد. در بخش های بعد با مشارکت دادن قطبهای سیستم خاک سازه در الگوریتم تخصیص قطب ها، به بررسی اثر اندرکنش خاک در روند کنترل سازه خواهیم پرداخت.

روش تخصیص قطبها

معادلات حرکت برای یک سیستم n درجه آزادی را که در معرض نیروی خارجی $f_e(t)$ و نیروی کنترل قرار دارد ، می توان به صورت زیر در نظر گرفت :

$$M\ddot{q}(t) + C\dot{q}(t) + Kq(t) = Lu(t) + H.f_e(t) \quad (1)$$

که در آن M و C و K ماتریسهای جرم و میرایی و فنر از مرتبه $n \times n$ می باشند. u نیروی کنترل از مرتبه 1×1 ، $f_e(t)$ بردار نیروی خارجی از مرتبه 1×1 و $q(t)$ بردار تغییر مکان از مرتبه $n \times 1$ و q_i تغییر مکان طبقه i ام نسبت به زمین است.

$$q = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad \dots \quad q_n \quad q_d]^T \quad (2)$$

معادله (۱) در فضای حالت به صورت زیر نمایش داده می شود.

$$\{\dot{x}\} = [A]\{x\} + [B]\{u\} + [E]f_e(t) \quad (3)$$

که در آن

$$\{x\} = \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

ماتریس های A و B و E به صورت زیر تعریف می شوند،

$$E = \begin{bmatrix} I \\ M^{-1}H \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}L \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (5)$$

ماتریس های A و B و E به ترتیب ماتریس سیستم، ماتریس موقعیت نیروی کنترل و ماتریس موقعیت نیروی خارجی هستند که به ترتیب از مرتبه $2n \times 2n$ و $2n \times m$ و $2n \times r$ می باشند. مقادیر ویژه (قطبها) در سیستم نماینده خصوصیات دینامیکی سیستم هستند و همانطور که در معادله (6) نشان داده شده است به صورت مقادیر مختلط می باشند.

$$\lambda_i = -\zeta_i \omega_i \pm j \omega_i \sqrt{1 - \zeta_i^2} \quad (6)$$

در فرمول بندی فضای حالت، قطب های سیستم از مقادیر ویژه ماتریس سیستم قابل محاسبه اند.

$$\det\{I - A\} = 0 \rightarrow \lambda_i = \zeta_i \pm j \omega_i \quad (7)$$

فرکانس های ویژه ω_i و نسبت های میرایی ویژه ζ_i سیستم کنترل نشده از حل مساله مقادیر ویژه به دست می آیند. نیروی کنترل از رابطه خطی زیر قابل محاسبه است.

$$u = -G \begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \end{bmatrix} = -GX \quad (8)$$

که در آن G ماتریس بهره از مرتبه $n \times 2n$ می باشد. که بر اساس مقادیر مطلوب قطبهای سیستم کنترل شده محاسبه می شود. با جایگذاری نیروی کنترل u در معادله (3)، معادله سیستم کنترل شده به صورت زیر نوشته می شود.

$$\dot{x}(t) = (A - BG)x(t) + Ef_e(t) \quad (9)$$

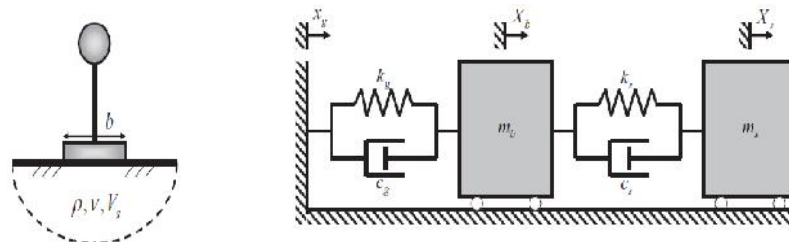
در معادله بالا ماتریس سیستم به صورت (A-BG) ظاهر شده است. قطب های جدید سیستم کنترل شده مقادیر ویژه ماتریس (A-BG) می باشد که متفاوت از مقادیر ویژه ماتریس سیستم A می باشند. چنین اصلاحی در ماتریس سیستم به مفهوم تغییر در مشخصات دینامیکی سیستم است. این روش کنترل که در آن ماتریس بهره G به گونه ای انتخاب می شود که قطب های سیستم کنترل شده دارای مقادیر ویژه از پیش تعریف شده ای می باشند، به روش تخصیص قطبها معروف است. در مورد یک سیستم سازه ای کنترل پذیر می توان با انتخاب ماتریس پس خوانند G قطبهای خاصی را به سیستم تحمیل نمود. در سالهای اخیر روشهای جدیدی برای انتخاب قطبها بر پایه آنالیز ویولت و فوریه سیگنال ورودی زلزله مطرح گردیده است (Pnevmatikos and Gantes, 2007; Pnevmatikos and Gantes, 2010).

مدل دینامیکی سیستم خاک سازه

در سیستم اندرکنش خاک سازه، خاک به دو محیط محدود نامنظم و نامحدود منظم که به ترتیب رفتار غیرخطی و خطی از خود نشان می دهند (Wolf, 1985). رفتار غیرخطی مصالح و غیرخطی هندسی دو نوع رفتار غیر خطی هستند که روی تحلیل تنش تولید شده با نوسانهای دینامیکی همچون زلزله تاثیر گذارند (Roesset and Tassoulas, 1982; McCallen and Romstad, 1994).

در سیستم خاک سازه دو روش برای محاسبات اندرکنش خاک وجود دارد: ۱- روش مستقیم ۲- روش زیرسازه. اختلاف این دو روش به تعریف شرایط مرزی محیط خاک محدود شده مربوط می شود. در روش مستقیم مرز مصنوعی تعریف شده برای محیط محدود شده دور از سطح مشترک خاک-سازه می باشد. اما در روش زیر سازه این مرز منطبق بر سطح مشترک خاک سازه منطبق می شود. با وجود اینکه روش مستقیم رفتار غیرخطی خاک را در نظر می گیرد، استفاده از این روش در عمل به دلیل مدلسازی پیچیده با تعداد زیاد درجات آزادی و حجم زیاد محاسبات متداول نیست (Wolf, 1994).

در این مقاله روش زیرسازه برای مدلسازی خاک به کار گرفته می شود و خاک و سازه به طور جداگانه در مدلسازی وارد می شوند. برای شبیه سازی عددی یک سازه با سیستم جداساز پایه با اثر اندرکنش خاک مدلسازی می شود که دارای دو درجه آزادی است. یک درجه آزادی برای سازه و یک درجه آزادی برای خاک). به طور کلی ساختمانهای با سیستم جداساز پایه مانند جسم صلب رفتار میکنند و متعاقباً تقریباً های یک درجه آزادی برای شبیه سازی پاسخ آنها به منظور مطالعه روش های کنترل مختلف مناسب است. شکل (۱) مدل مورد استفاده در این مقاله برای سیستم خاک سازه را نشان می دهد.



شکل ۱: مدل به کار گرفته شده برای سیستم خاک سازه

پارامترهای خاک که برای این مدل استفاده شده اند از رابطه (۹) و (۱۰) قابل محاسبه می باشند (Parmelee et al., 1968).

$$k_g = \frac{6.77}{1.79 - \epsilon} \dots V_s^2 \cdot r \quad (9)$$

$$c_g = \frac{6.21}{2.54 - \epsilon} \dots V_s \cdot r^2 \quad (10)$$

با در نظر گرفتن نیروی اندرکنش خاک به صورت $r_b = c_g \dot{x}_b + k_g x_b$ ماتریس های جرم، سختی و میرایی سیستم خاک سازه از رابطه زیر به دست می آیند:

$$\mathbf{M}_{SSI} = \begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_b \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{C}_{SSI} = \begin{bmatrix} c_s & -c_s \\ -c_s & c_s + c_g \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{K}_{SSI} = \begin{bmatrix} k_s & -k_s \\ -k_s & k_s + k_g \end{bmatrix} \quad (13)$$

نتایج عددی

به منظور تحقیق درباره اثر اندرکنش خاک سازه بر روش تخصیص قطبها، عملکرد سیستم کنترلی بر روی سیستم خاک سازه و سیستم سازه ای با انتهای گیردار (بدون اثر اندرکنش و با اثر اندرکنش) بررسی و مقایسه می شود. مدل معرفی شده در فوق به عنوان مثال عددی در نظر گرفته می شود. خصوصیات فیزیکی سازه و خاک در جدول (۱) آورده شده است. سختی جانبی سازه 10^4 نیوتن بر مترمربع فرض می شود و میرایی سازه از رابطه زیر به دست می آید.

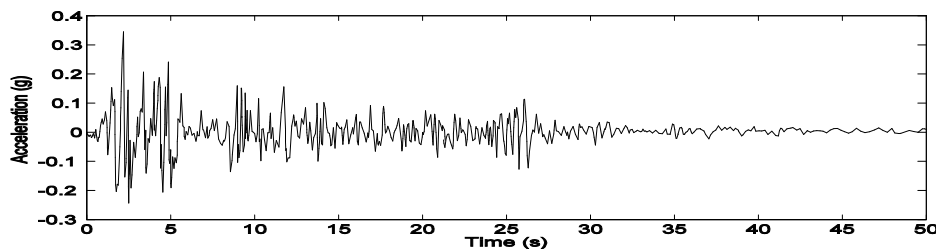
$$c_s = 0.004k_s + 0.001m_s \quad (14)$$

سرعت موج برشی نماینده شرایط خاک است. هر چه سرعت موج برشی بزرگتر باشد، خاک سخت تر است و هر چه سرعت موج برشی کمتر باشد خاک نرم تر است. برای تحقیق درباره جنس های مختلف خاک چهار سرعت مختلف موج برشی برای خاک در نظر گرفته می شود ($V_s = 50, 100, 200$ and 300 m/s).

جدول ۱: پارامترهای خاک و سازه برای ارزیابی عددی

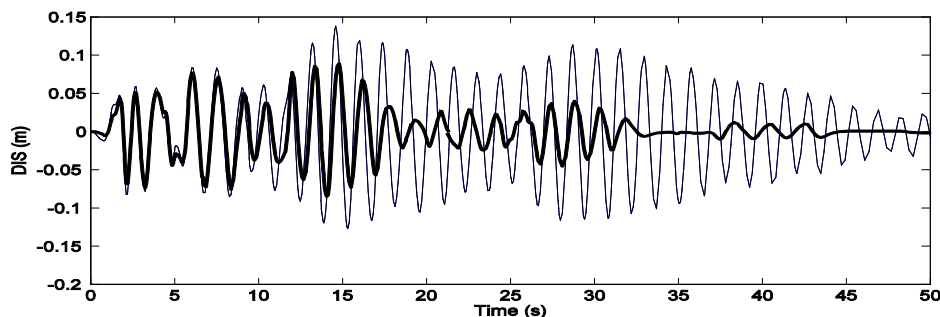
پارامترهای سازه		پارامترهای خاک	
m_s (kg)	5000000		0.45
m_b (kg)	5000000	(Kg/m ³)	1500
r (m)	10	V_s (m/s)	50,100,200,300

رکورد زلزله به کار گرفته شده در این تحقیق مربوط به زلزله سنترو با شتاب ماکزیمم 0.35 می باشد که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: تاریخچه زمانی شتاب زمین برای زلزله سنترو

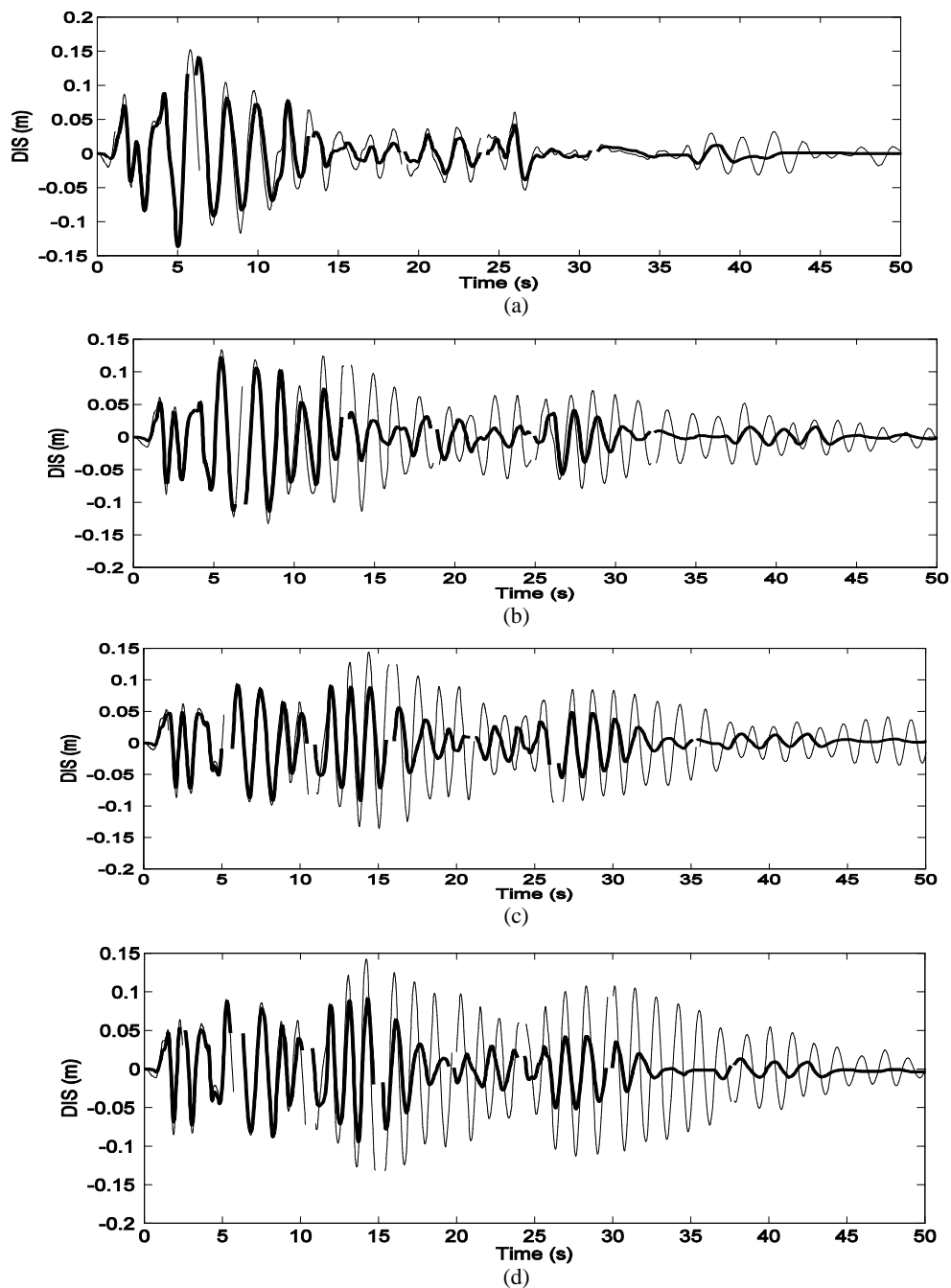
نتایج پاسخهای کنترل شده تغییر مکان با روش تخصیص قطب ها برای سازه با انتهای گیردار و سازه با اثر اندرکنش خاک در اثر زلزله سنترو در شکل ۳ و ۴ با پاسخهای کنترل نشده مقایسه شده است. همانطور که قبلا اشاره شد، به منظور تحقیق درباره شرایط مختلف خاک چهار سرعت مختلف برای موج برشی خاک در نظر گرفته شده و نتایج مربوطه در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۳: پاسخهای تغییر مکان کنترل شده و کنترل نشده برای سازه با انتهای گیردار

همانگونه که از شکل (۴) پیداست، برای سیستم خاک سازه با خاک سخت تر که دارای سرعت موج برشی بیشتری است، رفتار سیستم کنترلی به سیستم سازه ای با انتهای گیردار نزدیک تر است. بنابراین در سیستمهای با خاک زیرسازه نسبتا سخت، نادیده گرفتن اثر اندرکنش خاک و گیردار فرض نمودن انتهای سازه تغییر زیادی در رفتار دینامیکی سیستم ایجاد نمی کند. اما در مورد خاک نرم وارد نمودن اثر اندرکنش خاک در محاسبات کنترل منجر به تضعیف عملکرد سیستم کنترل می شود. چرا که همانگونه که از شکل پیداست نمودار تغییرمکانهای مربوط به سیستم کنترل شده و کنترل نشده تقریبا منطبق اند و کنترل سیستم تاثیری در کاهش پاسخ ها نخواهد داشت. لازم به ذکر است به دلیل اقتصادی نیروهای کنترل اعمال شده به سازه به مقدار یک دهم وزن سازه محدود شده اند.





شکل ۴: پاسخهای تغییر مکان کنترل شده و کنترل نشده برای سیستم خاک سازه با $(a) vs=50$ $(b) vs=100$ $(c) vs=200$ $(d) vs=300$ متر بر ثانیه

نتیجه گیری

این مقاله اثر اندرکنش خاک را در کنترل فعال سازه هایی که در معرض زلزله قرار دارند بررسی می کند. روش تخصیص قطبها جهت کنترل سازه به کار گرفته می شود و به منظور بررسی اثر اندرکنش خاک بر الگوریتم کنترل تخصیص قطبها، سیستم سازه ای یک بار بدون اثر اندرکنش خاک و بار دیگر با اثر اندرکنش تحت کنترل قرار می گیرد و میزان کارایی الگوریتم کنترل در کاهش پاسخ ها ارزیابی می شود. مدل به کار گرفته شده برای منظور کردن اثر اندرکنش خاک یک مدل دو درجه آزادی می باشد که پارامترهای سختی و میرایی آن به سرعت موج برشی خاک وابسته اند. برای تحقیق درباره جنس خاک و میزان نرمی و سختی آن سرعت موج برشی متغیر در نظر گرفته می شود. بررسی های عددی نشان میدهد که اثر اندرکنش خاک منجر به تغییراتی در میزان کارایی الگوریتم کنترل می گردد. به خصوص در مورد خاک نرم اثر اندرکنش خاک باعث تضعیف عملکرد سیستم کنترلی در کاهش پاسخ های دینامیکی می شود. بنابراین ایده آل سازی سیستم سازه ای با نادیده گرفتن اثر اندرکنش خاک همواره مناسب نبوده و به خصوص در مواقعی که خاک زیر سازه نرم می باشد، وارد نمودن اثر خاک در محاسبات کنترل بسیار ضروری است.

- Abdel – Rohman M and Leipholz H (1978) Structural Control by Pole Assignment Method . *J. Eng . Mech*, ASCE , 104(5): 1159-1175
- Amini F (1995) Response of Tall Structures Subjected to Earthquake using a New Combined Method of Pole Assignment and Optimal Control, *Second International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE-2)*
- Amini F (1996) New Algorithm in Active Control by Considering Active Forces as Function of Accelerations, Velocities and Displacements, *First European Conference on Structural Control* , Barselona , Spain
- Amini F and Shadlou M (2011), Embedment effects of flexible foundations on control of structures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 31: 1081-1093
- Amini F, Wang PC and kozin F (1983) Vibration Control of Tall Buildings, *Engineering Structures*, 5: 282-289
- Aviles J and Perez-Rocha LE (2003) Soil–structure interaction in yielding systems *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32: 1749–71
- Brogan WL (1974) Application of determinant identity to pole assignment and observer problems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19:689–692
- Ghannad MA and Ahmadnia A (2006) The effect of soil–structure interaction on the inelastic structural demands, *European Earthquake Engineering*, 20(1): 23–35
- Leipholz HHE (1986) Control of Structures, Martinus Nijhoff Publishers , Dordrecht , Netherlands
- Martin RC and Soong TT (1976) Modal control of multistory structures, *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 102:613–623
- McCallen DB and Romstad KM (1994) Nonlinear model for building–soil systems, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 120(5): 1129-1152
- Meirovotch L (1990) Dynamics and Control of Structure. Wiley; New York
- Novak M (1974) Effect of soil on structural response to wind and earthquake, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3: 79–96
- Ogata K (1997) Modern Control Engineering (3rd edn). Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ
- Parmelee RA, Perelman DS and Lee SL (1968) Seismic response of single story interaction systems, *J. Struct. Div.*, ASCE 94, No. ST11, Proc. Paper 6235
- Pnevmatikos N and Gantes C (2007) Pole Selection for Structural Control using the Complex Fourier Characteristics of the incoming Earthquake. *J Struct Control Health Monit*, 14:428-47
- Pnevmatikos N and Gantes C (2010) Control Strategy for Mitigating the Response of Structures Subjected to Earthquake Actions. *J Engineering Structures*, 32:3616-3628
- Rodriguez ME and Montes R (2000) Seismic response and damage analysis of buildings supported on flexible soils, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29: 647–65
- Roeset JM and Tassoulas JL (1982), Nonlinear Soil-Structure Interaction: An Overview, In: Data SK, editor. *Earthquake Ground Motion and Its Effects On Structures*. A.S.M.E., AMD, vol. 53
- Sage AP and White CC (1977) Optimum Systems Control (2nd edn). Prentice-Hall; Englewood Cliffs, NJ
- Shen S and Manzari MT (2002), Optimal control of framed structures including seismic soil-structure interaction effects, Proc., *15th ASCE engineering mechanics conference*, Culombia University, New York, N.Y., 2-5 June
- Smith HA and Wu WH (1997) Effective optimal structural control of soil-structure interaction systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26: 549-70

- Soong TT (1990) Active Structural Control: Theory and Practice. Longman Scientific & Technical/Wiley: London/New York
- Utku S (1998) Theory of Adaptive Structures: Incorporating Intelligence into Engineered Products. CRC Press: Florida
- Veletsos AS (1977) Dynamic of structure-foundation systems, *Structural and Geotechnical Mechanics*, Englewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall. p.p 333–61. A Volume Honoring N.M. Newmark
- Wolf JP (1994) Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models, Englewood Cliffs, NJ. Prentice-Hall
- Wolf JP (1985) Dynamic soil–structure interaction, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall
- Wu WH, Wang JF and Lin CC (2001) Systematic assessment of irregular building–soil interaction using efficient modal analysis, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30(4): 573–94
- Zhang XZ, Cheng FY and Jiang HP (2006) Hybrid actuator-damper-bracing control (HADBC) system with intelligent strategy and soil-structure interaction, *Engineering Structures*, 28: 2010–2022

