

کنترل هماهنگ ساز با استفاده از الگوریتم H_{∞} برای سازه تحت بار زلزله با وجود دینامیک مدل نشده در سازه

جواد مصباحی* و علاءالدین ملک**

*گروه عمران، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷ - ۱۹۳۹۵، تهران

**گروه ریاضی کاربردی، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۳/۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۵

چکیده: در این مقاله از کنترل هماهنگ ساز جهت سازه پنج طبقه Kajima Shizuoka تحت رکورد زلزله السنترو استفاده نموده و موفقیت آن در حفاظت لرزه ای ساختمان مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به جفت هماهنگ ساز، مقادیر اندازه تغییر مکان (e) ، تغییر مکان نسبی بین طبقات (ε) و خطای موقعیت توأم E_C را مورد بررسی قرار داده ایم. با استفاده از معادله دیفرانسیل مربوط به معادله حرکت و معادله حالت، ضرایب را مشخص و سپس با توجه به استفاده از نرم تابع و حل معادله ریکاتی کنترلر H_{∞} را طوری طراحی نمودیم تا کنترلر نسبت به عدم قطعیت و دینامیک مدل نشده، مقاوم و از عملکرد خوبی برخوردار باشد. نتایج را به صورت شکل های مقایسه ای به دست آورده و ارائه گردید.

واژه های کلیدی: کنترل هماهنگ ساز، کنترل H_{∞} ، دینامیک مدل نشده، معادله ریکاتی.

رده بندی ریاضی (۲۰۱۰): ۳۷H۹۹، ۳۴H۰۹

۱ - مقدمه

از آنجایی که بارهای دینامیکی شدید می توانند موجب خرابی سازه های را فراهم سازند، مهندسين تلاش می کنند تا تخریب در اثر بارهای فوق الذکر را کاهش دهند. با به کارگیری تکنولوژی های کنترل لرزه ای یکی از راهکارهای کاهش پاسخ سازه ها در اعمال بارهای دینامیکی شدید است. کنترل سازه ها در قالب کنترل غیرفعال، کنترل نیمه فعال، کنترل فعال می باشند. در سیستم های

فعال و نیمه فعال، سنسورها اطلاعات را از سازه در طول زمان بارگذاری دینامیکی جمع آوری و به کنترل کننده ارسال می نمایند. تا پس از پردازش، توسط یک الگوریتم کنترلی نیروی کنترلی مناسب تعیین و سیگنال کنترلی به عملگرها ارسال می گردد و ارتعاشات سازه را کنترل می نماید. هدف الگوریتم های کنترلی، تعیین بهینه نیروی کنترلی و کاهش پاسخ ارتعاشی سازه می باشد [۲،۱]. کاهش در پاسخ ارتعاشی باید به صورتی باشد تا نیروهای داخلی سازه نیز به مینیمم مقدار خود برسند. بدین منظور الگوریتم کنترلی باید طوری تنظیم شود تا جابجایی نسبی طبقات در بین درجات آزادی به مینیمم مقدار خود برسند، اصطلاحاً هماهنگ^۱ شوند. هماهنگی حرکتی^۲ در سیستم هایی که از چند عامل (agent) با مختصات مختلف اما برای انجام یک هدف مشترک به طور هماهنگ تشکیل شده اند از اهمیت ویژه ای برخوردار است [۳]. در چنین کاربردهایی برای رسیدن به یک هدف مشترک، ابتدا باید مسیریابی صحیح انجام و پایداری و هماهنگی هر یک از زیر سیستم ها به وجود آید تا پایداری کل سیستم تأمین گردد. هماهنگی حرکتی بین زیر سیستم ها در حقیقت ارتباط بین حرکت نسبی آن ها می باشد. در بسیاری از سیستم های کنترلی علاوه بر نیاز به شروع و توقف هماهنگ زیر سیستم ها، هماهنگی بین موقعیت، سرعت و شتاب این زیر سیستم ها نیز از اهمیت خاصی برخوردار می باشد. همواره دینامیک مدل ریاضی که برای طراحی کنترل کننده بکار می رود با دینامیک واقعی سازه مطابقت نداشته و این عدم تطابق به دلیل نقص در سازه، تغییر جرم قرار گرفته روی سازه، تأثیر خستگی بر روی مصالح سازه، عدم شناسایی درست سازه و یا به دلیل عدم قرارگیری سنسورها و عملگرها در محل صحیح به وجود می آید. این عدم تطابق را می توان به صورت دینامیک مدل نشده و با عدم قطعیت در مدل سازی بیان نمود. هدف اصلی از کنترل کننده H_∞ ، کنترل و تنظیم خروجی های تنظیم شده می باشد به گونه ای که اغتشاشات ورودی و عدم قطعیت مدل بر روی عملکرد سیستم تأثیری نداشته باشد. کنترل H_∞ بدترین پاسخ سیستم را به اغتشاشات و ورودی های ناشناخته کاهش می دهد، یا به عبارت دیگر ماکزیمم مقدار پاسخ سازه را در حوزه فرکانس به سبب اغتشاشات وارده مینیمم می نماید که در حقیقت کنترل کننده با مینیمم سازی نرم H_∞ تابع تبدیل خروجی های ارزیابی به ورودی های ناشناخته و اغتشاشی به این قابلیت دست می یابد. کنترل H_∞ عملکردی در جهت مینیمم سازی کلی پاسخ ها و نیروی های کنترلی،^۱ در بدترین شرایط دارد و باعث حداقل شدن جابجایی و جابجایی نسبی طبقات در سازه خواهد شد.

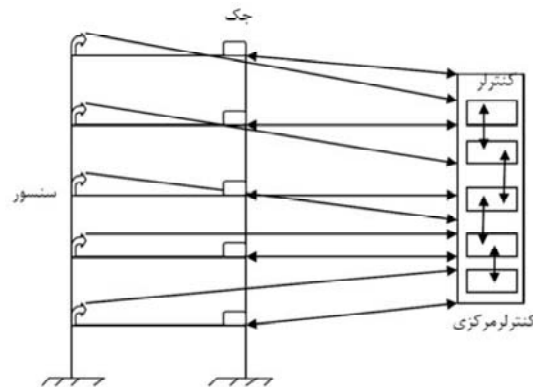
1 - Synchronize

2 motion synchronization

۲- هماهنگ ساز و تاریخچه هماهنگ ساز

یکی از پیامدهای هماهنگ سازی بین عوامل متعدد یک سیستم، هماهنگی بین پارامترهای مؤثر در حرکت بین عناصر متعدد آن سیستم می گردد. این موضوع باعث می گردد تا برخی از عوامل مورد نظر مدیران در کنترل و تنظیم آن سیستم رعایت گردد. مدیران تصمیم گیرنده در تنظیم امور سیستم ها ممکن است به مفاهیمی از قبیل امنیت در حرکت قطارها، پرواز هواپیماها و کشتی ها نظر داشته باشند. ممکن است ما علاقه مند باشیم تا ساعت های عقبه ای با دقت عملکردی خوبی طراحی نماییم، لذا منطقی است که هماهنگی بین عقبه های ثانیه شمار، دقیقه - شمار و ساعت شمار تنظیم گردد. گروهی از مدیران ممکن است به افزایش بهره وری جهت کاهش هزینه ها بیندیشند، لذا هماهنگ سازی پارامترهای مختلف طراحی، تولید و بهره برداری بایستی بر اساس قوانین موجود هر کشور تنظیم گردد تا بهره وری بیشتری و صرفه جویی مناسب انجام گیرد. این هماهنگ سازی ها هر چند در هر سیستم متفاوت روی پارامترهای مختلفی انجام می - گردد، اما از لحاظ ریاضی ممکن است از یک اصول منطقی واحدی پیروی نمایند. مثلاً ممکن است برای مدیران بسیاری از سیستم های چند عامله هماهنگ سازی پارامترها برای صرفه جویی در وقت مهم باشد. برای مهندسين طراح ساختمان ها که سازه طراحی شده آن ها، تحت بار زلزله و بادهای شدید قرار می گیرند، اهمیت دارد تا جابجایی نسبی طبقات منبسط از زلزله را به گونه ای هماهنگ شده تنظیم نمایند تا حداقل خسارت ممکنه را در بدترین حالات داشته باشند. به همین دلیل با تعبیه سنسورها و جک های مخصوصی در طبقات مختلف با دریافت اطلاعات علمی زلزله جک های مورد نظر را به صورت هماهنگ شده تنظیم نمایند. این مطلب می تواند با تنظیم و مینیمم سازی جابجایی نسبی در طبقات به هدف اصلی که همان کاهش خسارت مالی و جانی است دست یابند. با توجه به دانش نویسندگان تاکنون محققى در رابطه هماهنگ سازی بین جابجایی نسبی در سازه تحت زلزله تحقیقاتی انجام نداده است. برای روشن شدن بیشتر مطلب هماهنگ سازی در شکل (۱) شماتیکی از عامل ها (طبقات)، سنسورها، کنترل گرها و عملگرها (جک) در سازه پنج طبقه آورده شده است.

کورن در سال ۱۹۸۰ تحقیقاتی در زمینه هماهنگ سازی بین محورهای چرخ ها انجام داده است [۴]. در سیستم های سنتی با عوامل متعدد، سیستم اطلاعات مربوط به هر عامل را دریافت و بدون بازخورد و مقایسه با عامل های دیگر، عملکردی (فرمان) را به سیستم می دهد. این موضوع باعث بعضی از خطاهای اجتناب ناپذیر در سیستم می گردد. از آنجاکه حرکت با استفاده از عامل های متعدد، باید در جهت دستیابی به هدف یا اهداف مورد نظر باشد، هرگونه اختلال در میان عوامل متعدد یک سیستم باعث اختلال کل سیستم می گردد. با استفاده از عملکرد هماهنگ ساز، می توان این اختلال ها را تنزل داده و حتی به صفر رساند. کلومینی در سال ۱۹۸۵ تحقیقاتی برای هماهنگ سازی در برنامه ریزی ماشین CNC انجام داد [۵].



شکل (۱): شماتیک کلی سازه پنج طبقه با پنج جک و پنج سنسور و پنج کنترلر و یک کنترل مرکزی

کورن و لو در سال ۱۹۹۱ در خصوص هماهنگ‌سازی و کنترل کلاچ خودرو، تحقیقات وسیعی انجام داده‌اند [۶]. در سال ۲۰۰۳ سان برای اولین بار پیشنهاد یک کنترل هماهنگ‌ساز تطبیقی که از یک الگوریتم هماهنگ‌ساز نشئت گرفته بود را ارائه نموده است [۷]. این الگوریتم توانسته است با هماهنگ‌سازی باعث بهبود خطاهای عامل محورهای حرکتی متعدد را به صورت همگرا به سمت صفر سوق دهد. این مطالعه در بهبود خطاهای ماشین‌های CNC صنعتی کاربرد فراوانی دارد. سان و همکارانش در سال ۲۰۰۵ یک روش هماهنگ‌سازی برای ردیابی مسیر ربات‌های موبایلی را پیشنهاد و تحقیقاتی در این زمینه انجام داده‌اند [۸]. در سال ۲۰۰۹ سان و تانگ تحقیقاتی در خصوص یک روش هماهنگ‌سازی برای مینیمم‌سازی خطاهای ابزار و ماشین‌آلات CNC داشتند. آن‌ها ثابت نمودند که چنین کنترلی می‌تواند همگرایی به سمت صفر را با هماهنگ‌سازی خطاها در کنترل موقعیت گسسته‌سازی شده به وجود آورد [۹]. همچنین آن‌ها توانستند ردیابی نقطه موردنظر را انجام دهند. در سال ۲۰۱۲ فرانسیسک یک مدل ریاضی برای محاسبه پاسخ کلی ارتعاش متصل به سیستم‌های مکانیکی ارائه نمود او با استفاده از مدل ارائه شده، استراتژی کنترل هماهنگ‌ساز ارتعاش سازه برای حفاظت از سیستم‌های لرزه‌ای را طراحی و پیشنهاد نمود. جیانگ و ژانگ در سال ۲۰۱۳ در خصوص برنامه‌ریزی حرکت و کنترل هماهنگ‌ساز بر روی ربات فک‌دار تحقیقاتی انجام دادند [۱۰]. از قابلیت‌های هماهنگ‌ساز در سیستم‌های مکانیکی استفاده نموده و به برنامه‌های کاربردی آموزشی پرداخت. او با استفاده از چندین سیستم مکانیکی فلسفه طراحی سیستم‌های کنترل هماهنگ‌ساز را بررسی نمود. در سال ۲۰۱۴ گوانمین زو در یک مطالعه الگوریتم هماهنگ‌ساز را در سیستم‌های بازو مکانیکی تحقیق نموده و پیشنهاداتی ارائه نموده است [۱۱]. در خاتمه در سال ۲۰۱۵ مصباحی و ملک از سیستم هماهنگ‌ساز در سازه پنج طبقه با استفاده از الگوریتم کنترل H_∞ / LQG استفاده نموده‌اند که

کاهش خوبی در جابجایی نسبی طبقات به دست آوردند [۱۲]. در این تحقیق، هدف استفاده از سیستم هماهنگ ساز جهت بار زلزله و بادهای شدید در سازه طبقاتی جهت کاهش خسارت جانی و مالی با استفاده از الگوریتم H_{∞} است. دو کنترل فوق دارای تفاوت هایی باهم می باشند. کنترل کننده H_{∞} سبب کاهش ماکزیمم پاسخ های ارزیابی در حوزه فرکانس در اثر اغتشاشات ورودی می گردد و یا همان مینیمم سازی نرم H_{∞} تابع تبدیل خروجی های ارزیابی به ورودی های ناشناخته و اغتشاشی و کنترل کننده H_p / LQG سبب کاهش انرژی کنترلی به طور هم زمان کاهش پاسخ های ارزیابی می گردد در حقیقت سبب کاهش سطح زیر نمودار تابع تبدیل خروجی های ارزیابی به ورودی های ناشناخته و اغتشاشی می شود. کنترل کننده H_{∞} نسبت به کنترل کننده H_p / LQG دارای ویژگی مقاوم بودن به ورودی های ناشناخته و اغتشاشی است.

۳- جفت کنترل کننده هماهنگ ساز

یک سیستم چندعاملی را در نظر بگیرید که n عامل از آن در یک فرآیند دخیل باشند، لذا نیاز به یک هماهنگ سازی برای تمام عامل ها می باشد. هدف کنترل هماهنگ ساز، هماهنگ سازی همه عامل ها است به طوری که عامل ها یک ارتباط سینماتیک خاصی را حفظ نمایند [۱۳]. تنظیم چند عامل برای حفظ ارتباط سینماتیکی می تواند به صورت راهنمایی و موقعیت دهی عامل ها در طول مرز (نحنی) از یک مجموعه بسته چند بعدی انجام پذیرد. $S(x, t)$ به عنوان یک تابع از متغیرهای زمان و مکان را در نظر می گیریم. در تابع S متغیر x ، متغیر فضای حالت و t متغیر زمان می باشد. مرز تابع $S(x, t)$ را به وسیله معادله $\partial S(x, t) = 0$ بیان می نماییم. در یک ساختمان پنج طبقه که هر طبقه را یک عامل در نظر می گیریم فرض کنید که برای $i = 1, \dots, 5$ $x_i(t)$ و $x_i^d(t)$ ب ترتیب به عنوان متغیرهای کلی حالت و مقادیر مطلوب متغیر حالت در عامل i ام باشند. $x_i^d(t)$ در معادله مرز صدق می نماید لذا $\partial S(x_i^d, t) = 0$ داریم. پس خطای متغیر حالت در عامل i ام به صورت زیر بیان می گردد:

$$e_i(t) = x_i(t) - x_i^d(t), \quad i = 1, \dots, 5 \quad (1)$$

هدف کنترل هماهنگ ساز در هر یک از عامل ها، همگرا شدن متغیرهای حالت به مقادیر مطلوب $x_i^d(t)$ به طوری که $e_i \rightarrow 0$ وقتی که $t \rightarrow \infty$ ، از سوی دیگر روابط را بر روی منحنی مطلوب $\partial S(x_i, t) = 0$ حفظ کند، [۱۳].

۴- الگوریتم کنترلی در قالب کنترل هماهنگ ساز با بازخورد شتاب

معادله حرکت یک سازه تحت بارهای دینامیکی به شکل یک معادله دیفرانسیل درجه دوم به شکل زیر می باشد [۱۴].

$$M\ddot{q}(t) + C\dot{q}(t) + Kq(t) = B_0 u(t) + LW(t) \quad (۲)$$

وقتی که M ، C و K به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی سیستم هستند. $q(t)$ بردار تغییر مکان طبقات، $\dot{q}(t)$ بردار سرعت طبقات، $\ddot{q}(t)$ بردار شتاب طبقات سازه $u(t)$ ، بردار نیروی کنترل و $w(t)$ بردار تحریکات (ناشی از بار زلزله یا باد) می‌باشند. B_0 و L به ترتیب ماتریس‌های مکان نیروی کنترل و تحریکات خارجی هستند. در سمت راست معادله (۲) ورودی‌های $w(t)$ اغتشاشی ناشی از زلزله و یا باد و $u(t)$ نیروهای کنترلی عملگرها (جک‌ها) می‌باشند. در سمت چپ معادله (۲) خروجی‌های جابجایی یا جابجایی نسبی، سرعت و شتاب برای طبقات با فرمول‌بندی ریاضی قابل محاسبه می‌باشد. مدل فضای حالت این معادله حرکت، بستگی به نوع مختصات انتخابی دارد. به‌طور معمول این مدل (۲) در مختصات نودال و یا مختصات مودال بیان می‌شود. برای به دست آوردن مدل نودال معادله (۲)، با فرض غیر واحد بودن ماتریس جرم M می‌توان معادله (۲) را به‌صورت زیر بازنویسی نمود:

$$\ddot{q}(t) + M^{-1}C\dot{q}(t) + M^{-1}Kq(t) = M^{-1}B_0 u(t) \quad (۳)$$

از طرف دیگر با تعریف بردار حالت متشکل از جابجایی (تغییر مکان) و سرعت داریم $x(t) = \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix}$ ، حال با مشتق‌گیری از طرفین این تساوی $x(t) = \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix}$ و استفاده از روابط ریاضی معادله حالت به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + B_1 u(t) + B_2 W(t) \quad (۴)$$

که در آن $A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$ ماتریس حالت، $B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}B_0 \end{bmatrix}$ ماتریس مکانی محرک داخلی و $B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}L \end{bmatrix}$ ماتریس مکانی تحریکات خارجی وارد به سیستم می‌باشند. سیستم کلی (۵) را در نظر بگیرید. بازخورد شتاب در این سیستم به این معنی است که متغیر شتاب به‌عنوان خروجی‌های اندازه‌گیری می‌باشد [۱۴].

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + B_1 u(t) + B_2 W(t) \\ Z(t) = C_1 X(t) + D_{11} W(t) + D_{12} u(t) \\ y(t) = C_2 X(t) + D_{21} W(t) + D_{22} u(t) + v \end{cases} \quad (۵)$$

وقتی که $Z(t)$ خروجی پارامترهای ارزیابی کلی سیستم (۵)، $y(t)$ خروجی‌های سنسورها و v نویز سنسور می‌باشد. (در این مطالعه سنسورها ایده‌آل و بدون هیچ‌گونه نویزی در نظر گرفته

شده‌اند). ماتریس‌های C_1, D_{11}, D_{12} در خروجی کلی $Z(t)$ به ترتیب متناظر با شتاب، سرعت و جابجایی یا جابجایی نسبی بین طبقات می‌باشد که $C_1 = \begin{bmatrix} I & \mathbf{0} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$ ، $D_{11} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ M^{-1}B \end{bmatrix}$ و $D_{12} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ M^{-1}L \end{bmatrix}$ که برای جابجایی و شتاب به‌طور مثال تعریف شده است برای جابجایی نسبی با کمی تغییر قابل ارائه می‌باشد. همچنین ماتریس‌های C_2, D_{21}, D_{22} در خروجی سنسورها $y(t)$ متناظر با شتاب، سرعت و جابجایی یا جابجایی نسبی بوده و بر اساس اینکه چه نوع سنسوری در مدل استفاده گردد، این خروجی‌ها داده می‌شوند. در مطالعه اگر سنسور شتاب مدنظر باشد آنگاه $C_2 = \begin{bmatrix} -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$ ، $D_{21} = \begin{bmatrix} M^{-1}B \end{bmatrix}$ و $D_{22} = \begin{bmatrix} M^{-1}L \end{bmatrix}$ تعریف می‌گردند [۱۵].

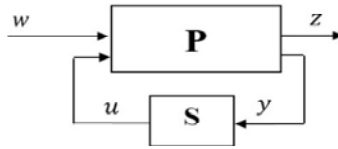
۵- الگوریتم کنترل H_∞

در این مقاله برای کنترل تغییر مکان، تغییر مکان نسبی یا شتاب از سیستم‌های فعال استفاده گردید. برای انجام بهینه کنترل فوق ممکن است از یکی از الگوریتم‌های کنترلی H_∞ / LQG یا H_∞ استفاده نمود. در این مقاله استفاده از الگوریتم H_∞ مورد بررسی قرار می‌گیرد که برای مینیمم نمودن بیشترین تغییر مکان نسبی، استفاده از روش کنترل هماهنگ ساز H_∞ مناسب است. در حقیقت نرم H_∞ یک مقیاس برای بدترین پاسخ مدل در طول بارگذاری (یا اغتشاش خارجی) می‌باشد [۱۶]. نرم H_∞ برای تابع تبدیل G عبارت است از:

$$\|G\|_\infty = \sup_{\omega \in \mathbb{R}} \sigma(G(j\omega)) \quad (۶)$$

هدف اصلی از الگوریتم کنترل کننده H_∞ مینیمم ساختن بیشترین تأثیر اغتشاشات ورودی بر روی خروجی‌های تنظیم شده می‌باشد. کنترل H_∞ پایداری و عملکرد سیستم را در برابر عدم قطعیت و اغتشاشات خارجی با نرم کران‌دار تضمین می‌کند. برای این منظور عدم قطعیت به صورت یک ورودی خارجی ناشناخته ولی با نرم کران‌دار در نظر گرفته می‌شود. با مینیمم‌سازی نرم H_∞ تابع تبدیل G حلقه بسته از ورودی‌های اغتشاشی به خروجی‌های تنظیم شده پایداری سیستم را حفظ می‌نماییم [۱۶]. شکل ۲ یک سیستم حلقه بسته را نشان می‌دهد، P پلان وضعیت سازه به همراه سنسور کنترلی و جک‌های کنترلی می‌باشد و S کنترل کننده می‌باشد که بازخورد کنترلی u را با توجه به خروجی‌های اندازه‌گیری شده y محاسبه نموده و به مدل سیستم P وارد می‌کند و w به عنوان ورودی اغتشاشی مدل، ناشی از پدیده زلزله و z به عنوان خروجی ارزیابی مدل می‌باشند. رابطه (۷) دینامیک سازه P را با توجه به ورودی‌های u نیروی

کنترلی حاصل از عملگرها (جک‌ها)، w اغتشاش حاصل از زلزله یا باد و خروجی‌های، ارزیابی z و اندازه‌گیری y (حاصل از سنسورها) را نشان می‌دهند.



شکل (۲): مدل حلقه بسته سیستم و سنسورهای کنترل کننده

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ Z \\ y \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} X \\ W \\ u \end{bmatrix} \quad (۷)$$

تابع تبدیل حلقه بسته رابطه (۷) را به صورت زیر بیان می‌نماییم:

$$Z = G(P, S)W \quad (۸)$$

وقتی که Z خروجی کلی سیستم، G تابع تبدیل و w اغتشاشات ورودی حاصل از پدیده‌های زلزله و باد می‌باشند.

۶ - الگوریتم کنترل مقاوم H_∞ جهت دینامیک مدل نشده

در مسائل دنیای واقعی همواره مدل ریاضی که برای طراحی کنترل کننده بکار می‌رود با دینامیک واقعی سازه مطابقت ندارد. به همین دلیل عدم قطعیت و یا به نوعی دینامیک مدل نشده در مدل به وجود خواهد آمد. این دینامیک مدل نشده به دلیل نقص در سازه، عدم شناسایی درست سازه و یا به دلیل عدم قرارگیری سنسورها و عملگرها در محل صحیح، به وجود می‌آید. لذا لازم می‌باشد تا کنترل کننده به شکلی طراحی گردد تا نسبت به این عدم قطعیت‌ها و دینامیک مدل نشده مقاوم باشد و سیستم کنترلی از عملکرد خوبی برخوردار گردد. هدف کنترل مقاوم H_∞ پیدا کردن کنترل کننده‌ای پایدار ساز به نحوی که اثر w را بر z به کمترین مقدار ممکن برساند و نرم H_∞ به صورت رابطه (۹) می‌شود

$$\|G(P, S)\|_\infty = \sup_{\omega \neq 0} \frac{\|Z\|_r}{\|W\|_r} = \sup_{\omega \neq 0} \bar{\sigma} (G(P, S)(j\omega)) \quad (۹)$$

که $\bar{\sigma}$ ماکزیمم مقدار ویژه تابع تبدیل G و $j\omega$ فرکانس در فضای مختلط می باشد. در عمل طراحی کنترل کننده ایی نزدیک نقاط بهینه موضعی بسیار آسان تر و زمان کمتری می برد. به این ترتیب مسئله H_∞ زیر بهینه مطرح می شود و هدف از آن به دست آوردن کنترل کننده زیر بهینه ای تحت عنوان S_{sub} می باشد، ه در رابطه نرم H_∞ زیر صدق کند، γ یک مقدار بزرگتر از صفر می باشد ($\gamma > 0$) [۱۷]

$$\|G(P, S_{sub})\|_\infty < \gamma. \quad (10)$$

با استفاده از پارامترهای رابطه (۷) و معادلات ریکاتی، با یک زیر مسئله روبرو می گردیم که در آن زیر بهینه کنترل H_∞ دارای یک پاسخ یکتا خواهد بود و مقادیر X_∞ ، Y_∞ و γ به دست خواهند آمد [۱۷]. در این صورت سه مورد زیر صادق است.

۱- یک ماتریس $X_\infty \in \mathbb{R}^{n \times n}$ وجود دارد که در معادله ریکاتی زیر صدق می کند:

$$X_\infty A + A^T X_\infty + X_\infty \left(\gamma^{-2} B_1 B_1^T - B_r B_r^T \right) X_\infty + C_1 C_1^T = 0$$

۲- یک ماتریس $Y_\infty \in \mathbb{R}^{n \times n}$ وجود دارد که در معادله ریکاتی زیر صدق می کند:

$$A Y_\infty + Y_\infty A^T Y_\infty + Y_\infty \left(\gamma^{-2} C_1^T C_1 - C_r^T C_r \right) Y_\infty + B_1 B_1^T = 0$$

۳- $\rho(X_\infty, Y_\infty) < \gamma^2$ که $\rho(X_\infty, Y_\infty)$ ماکزیمم مقدار ویژه ماتریس $G(P, S_{sub})$ می باشد.

یعنی بزرگترین مقدار ویژه این ماتریس پاسخ این تابع می باشد.

به این ترتیب کنترل کننده H_∞ به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$K_{sub} = \begin{bmatrix} A_\infty & -Z_\infty L_\infty \\ F_\infty & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

وقتی که

$$A_\infty = A + \gamma^{-2} B_1 B_1^T X_\infty + B_r F_\infty + Z_\infty L_\infty C_r$$

$$F_\infty = -B_r^T X_\infty, L_\infty = -Y_\infty C_r^T, Z_\infty = \left(1 - \gamma^{-2} Y_\infty X_\infty \right)^{-1}$$

$$F_\infty \in \mathbb{R}^{q \times n}, L_\infty \in \mathbb{R}^{n \times p}, Z_\infty \in \mathbb{R}^{n \times n}$$

معادلات جبری ریکاتی فوق توسط Matlab Robust Toolbox حل گردید تا مجهول‌های A_∞ ، F_∞ و Z_∞ به دست آیند. با استفاده از مقادیر فوق A_c ، B_c ، C_c و D_c به صورت زیر توصیه می‌گردد:

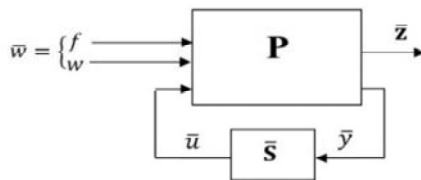
$$A_\infty = A + \gamma^{-2} B_1 B_1^T X_\infty + B_2 F_\infty + Z_\infty L_\infty C_2 \quad (12)$$

که در آن A_c ، B_c ، C_c و D_c کنترل‌کننده‌های دینامیکی می‌باشند. حال کافی است پارامترهای ارزیابی الگوریتم کنترلی را طوری تعریف کنیم که علاوه بر هدف تنظیم خروجی‌ها، هدف هماهنگ‌سازی را نیز تأمین کند. به دلیل اینکه در کنترل سازه هدف کنترل ارتعاش سازه می‌باشد لذا جابجایی‌های درجات آزادی سازه را به عنوان خطای متغیر حالت در نظر گرفته و به عنوان خروجی‌های تنظیم شده معرفی می‌نماییم. سپس مینیمم نمودن اختلاف بین درجات آزادی‌های متوالی به عنوان هدف کنترل هماهنگ‌سازی تعریف می‌شود. هدف کنترل هماهنگ‌سازی سبب هماهنگی در جابجایی‌ها و کاهش نیروهای داخلی حالت با دینامیک مدل نشده را می‌شود. در طراحی کنترل‌کننده H_∞ این امکان وجود دارد که با در نظر گرفتن دینامیک مدل نشده به عنوان نوعی از ورودی‌های اغتشاشی کنترل‌کننده را نسبت به این دینامیک‌های ناشناخته مقاوم طراحی نمود. مدل فضای می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + B_1 W(t) + B_2 u(t) + B_f f(t) \\ Z(t) = C_1 X(t) + D_{11} W(t) + D_{12} u(t) + D_{1f} f(t) \\ y(t) = C_2 X(t) + D_{21} W(t) + D_{22} u(t) + D_{2f} f(t) + v \end{cases} \quad (13)$$

که $f(t)$ دینامیک مدل نشده سیستم می‌باشد. با در نظر گرفتن نیروی دینامیکی تصادفی، ورودی‌های اغتشاشی به صورت $\bar{w} = [w^T \quad f^T]^T$ بازنویسی می‌شوند که دارای مؤلفه‌های قطعی و تصادفی هستند و به طور متناظر ماتریس‌های $\bar{B}_1 = [B_1 \quad B_f]$ و $\bar{D}_{11} = [D_{11} \quad D_{1f}]$ تعریف می‌شوند، لذا سیستم قطعی (۵) به سیستم قطعی-تصادفی زیر تبدیل می‌گردد. شکل ۳ نشان‌دهنده مدل حلقه بسته سیستم به همراه دینامیک مدل نشده و سنسورهای کنترل‌کننده می‌باشد.

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + \bar{B}_1 \bar{W}(t) + B_2 \bar{u}(t) \\ \bar{Z}(t) = C_1 X(t) + \bar{D}_{11} \bar{W}(t) + D_{12} \bar{u}(t) \\ \bar{y}(t) = C_2 X(t) + \bar{D}_{21} \bar{W}(t) + D_{22} \bar{u}(t) + v \end{cases} \quad (14)$$



شکل (۳): مدل حلقه بسته سیستم به همراه دینامیک مدل نشده و سنسورهای کنترل کننده

آنگاه تابع تبدیل حلقه بسته (۸) برای فضای حالت قطعی- تصادفی به صورت رابطه (۱۵) بیان شود:

$$\bar{Z} = G(p, \bar{S}) \bar{W} \quad (15)$$

هدف به دست آوردن کنترل کننده $\bar{S}$ برای مینیمم ساختن نرم H_∞ تابع تبدیل $G(p, \bar{S})$ از $\bar{W}$ به $\bar{Z}$ می باشد. حال با فرض $\|f(t)\| \leq \beta$ که β یک مقدار ثابت و مشخص می باشد، می توان کنترل کننده دلخواه این تابع تبدیل را با استفاده از رابطه (۱۵) - (۱۲) به دست آورد. به این ترتیب کنترلی مقاوم در برابر دینامیک مدل نشده و اغتشاش خارجی طراحی خواهد شد.

۷- مدل سازه مورد ارزیابی

در این بخش مدل یک سازه ۵ طبقه در نظر گرفته شده است که مشابه ساختمان Kajima Shizuoka می باشد؛ که دارای عملگرهای هیدرولیک می باشد و در بین هر دو طبقه همسایه قرار گرفته است، (نگاه کنید به شکل ۴) معادله حرکت این ساختمان می تواند توسط معادله (۲) که یک معادله دیفرانسیل مرتبه دوم می باشد ارائه شود. در اثر زلزله (شتاب زمین) نیروی زلزله (تحریکات خارجی) بر سازه اعمال می گردد. نیروی زلزله اعمالی بر سازه به تناسب جرم (وزن) هر طبقه در طبقات توزیع می گردد [۱۷].

Floor	Seismic Mass	Story Stiffness
1	$215.2 \times 10^3 \text{ kg}$	$147.0 \times 10^3 \text{ kN/m}$
2	$209.2 \times 10^3 \text{ kg}$	$113.0 \times 10^3 \text{ kN/m}$
3	$207.0 \times 10^3 \text{ kg}$	$99.0 \times 10^3 \text{ kN/m}$
4	$204.8 \times 10^3 \text{ kg}$	$89.0 \times 10^3 \text{ kN/m}$
5	$266.1 \times 10^3 \text{ kg}$	$84.0 \times 10^3 \text{ kN/m}$



شکل (۴): مدل یک ساختمان ۵ طبقه مشابه ساختمان Kajima Shizuoka که در آن جرم ها و سختی ها برای کلیه طبقات آورده شده است [۱۹، ۱۸].

M, B_0, C, K به ترتیب ماتریس‌های جرم، مکان نیروی کنترل، تحریکات خارجی، میرایی و سختی داده شده به شرح زیر می باشد:

$$M = 10^7 \times \begin{bmatrix} 215/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 209/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 207/0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -89 & 204/8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 266/1 \end{bmatrix}, B_0 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$L = -M \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, C = 10^7 \times \begin{bmatrix} 650/4 & -231/1 & 0 & 0 & 0 \\ -231.1 & 548/9 & -202/5 & 0 & 0 \\ 0 & -202/5 & 498/6 & -182/0 & 0 \\ 0 & 0 & -182/0 & 466/7 & -171/8 \\ 0 & 0 & 0 & -171/8 & 318/5 \end{bmatrix},$$

$$K = 10^6 \times \begin{bmatrix} 260 & -113 & 0 & 0 \\ -113 & 212 & -99 & 0 \\ 0 & -99 & 188 & -89 \\ 0 & 0 & -89 & 173 \\ 0 & 0 & 0 & -84 & -84 \end{bmatrix}$$

با میرایی به مقدار ۵٪، فرکانس‌های مربوطه به شرح زیر به دست آمده است.

$$\omega_i = \{ 42/542, 36/426, 28/225, 17/742, 6/334 \}$$

که جرم برحسب کیلوگرم kg ضریب میرایی برحسب M, B_0, C, K و ضریب سختی برحسب N/m می باشد. در سازه فوق سه سنسور شتاب در طبقات اول، سوم و پنجم لحاظ شده که شتاب این طبقات را به کنترلر فرستاده و کنترلر با تخمین متغیرهای حالت نیروی کنترلی مناسب را تولید می کند. با استفاده از ماتریس‌های تبدیل، رکوردهای شتاب سنج‌ها را به پاسخ‌های جابجایی و سرعت تبدیل می نماییم. با توجه به بردار حالت (جابجایی و سرعت) مدل سازی، خروجی‌های اندازه گیری شده از جنس شتاب در رابطه (۱۴) (با فرض نویز برابر صفر) به صورت

$$\bar{y}(t) = C_r x(t) + \bar{D}_r \bar{w}(t) + D_{rr} \bar{u}(t)$$

با ضرایبی به صورت

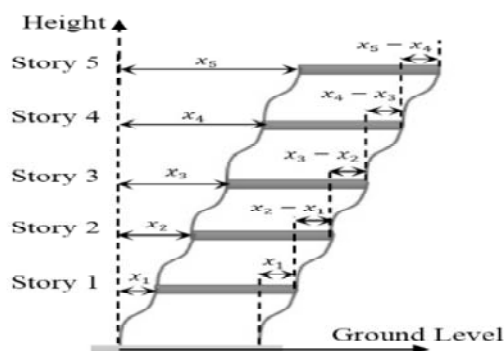
$$\bar{D}_{rr} = \eta \times [M^{-1}L \quad D_{rf}] \quad \text{و} \quad D_{rr} = \eta \times [M^{-1}B_0], \quad C_r = \eta \times [-M^{-1}K \quad -M^{-1}C]$$

می باشد و η به صورت زیر تعریف می شود:

$$\eta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

برای اعمال الگوریتم کنترلی H_∞ در قالب کنترل هماهنگ ساز در این مدل ساختمانی، لازم است خطای متغیرهای حالت را از مقادیر مورد انتظار تعیین نموده و سپس در خروجی‌های ارزیابی معرفی نماییم؛ بنابراین جابجایی هر طبقه را به عنوان متغیر حالت برای تعیین خطا در نظر می‌گیریم، مقادیر مورد انتظار برای خطا صفر می‌باشد. لذا خطای متغیرهای حالت در هر لحظه برابر با اندازه جابجایی مطلوب طبقات می‌باشد و هدف از الگوریتم کنترلی رساندن این مقادیر به صفر می‌باشد، (شکل ۵). برداری را که اندازه جابجایی ۵ طبقه در آن آورده شده است به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$e = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \quad (16)$$



شکل (۵): تغییر مکان و تغییر مکان نسبی طبقات

از طرفی برای هدف هماهنگ سازی تغییر مکان نسبی بین طبقات، بردار ε به عنوان مرز شامل مؤلفه‌های حداکثر تغییرات جابجایی بین طبقات در نظر گرفته می‌شود، به طوری که بر روی مرز تغییر مکان بر روی منحنی مطلوب $\partial S(x_i, t) = 0$ باشد. به این ترتیب تغییر مکان نسبی بین طبقات ε ، به عنوان خطای هماهنگ سازی در نظر گرفته می‌شود، (شکل ۵) تغییر مکان نسبی بین طبقات (دریافت) به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\varepsilon(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = (x_1, (x_2 - x_1), (x_3 - x_2), (x_4 - x_3), (x_5 - x_4)) \quad (17)$$

کوچک شدن تغییر مکان نسبی طبقات سبب تغییر مکان منظم سازه می‌شود و این امر سبب کاهش نیروهای داخلی سازه می‌گردد. همچنین خطای موقعیت توأم^۱ را به صورت زیر در نظر می‌گیریم:

$$E_c = (I + \alpha T) e \quad (18)$$

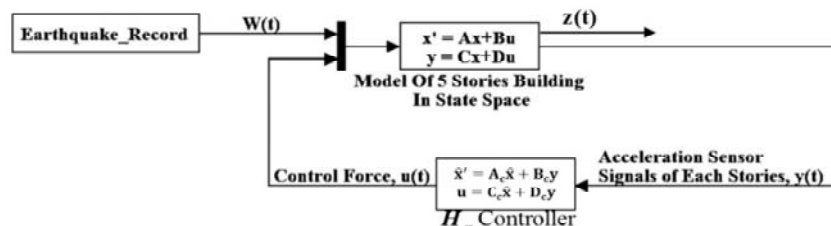
که با توجه به معادله (۱۶) و (۱۷)، T به عنوان ماتریسی برای به دست آوردن اختلاف جابجایی طبقات تعریف می شود:

$$\varepsilon = T e \quad (19)$$

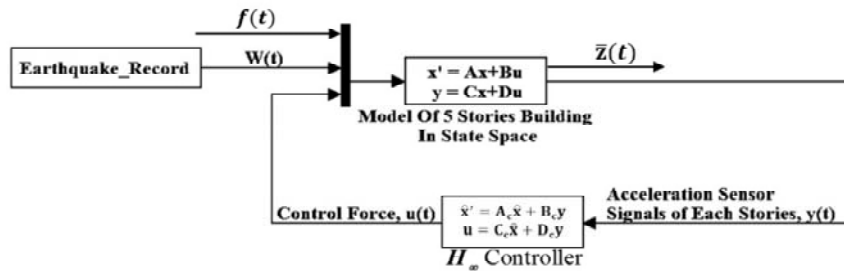
$$T = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

α و ماتریس یکه است، به این ترتیب ماتریس $(I + \alpha T)$ معکوس پذیر و با میل e به سمت صفر، E نیز به صفر میل می کند و بلعکس [۱۳]. توجه داشته باشید که طراحی ریاضی این مسئله تاکنون به گونه ای بوده است که خروجی z بتواند هم اهداف تنظیم خروجی و هم اهداف هماهنگ سازی بین خطای جابجایی نسبی برای هر دو طبقه مجاور را تنظیم نماید. سازه فوق در نرم افزار MATLAB در محیط شبیه سازی شده برای زلزله های مختلف مدل سازی شد (شکل ۶). در این مدل در ابتدا رکورد زلزله، $W(t)$ ، به مدل سازه وارد شده و سپس پاسخ های ارتعاشی سازه توسط سنسورهای شتاب، $y(t)$ ، به کنترل کننده انتقال داده می شود. در نهایت کنترل کننده نیروی مناسب کنترلی $u(t)$ ، را به سازه وارد می کند که در نتیجه ارتعاشات بیش از حد سازه کنترل می شود.

متغیر $\hat{x}$ ، متغیر حالت تخمین زده شده می باشد که از طریق شتاب های اندازه گیری شده توسط کنترلر تخمین زده می شود.



شکل (۶): مدل شماتیک شبیه سازی در نرم افزار MATLAB برای یک زلزله با الگوریتم کنترلی H_∞



شکل (۷): مدل شماتیک شبیه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB برای یک زلزله با الگوریتم کنترلی H_∞ مقاوم

همچنین در این سازه فرض شده است که دینامیک مدل نشده به صورت یک ورودی ناشناخته، با توجه به معادله (۱۳) در فضای حالت تعریف می‌شود:

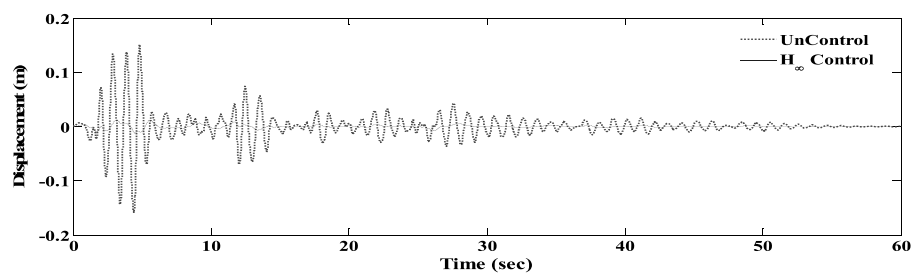
$$f(t) = 0.2 \sin(1.0t) \quad (20)$$

$$B_f = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

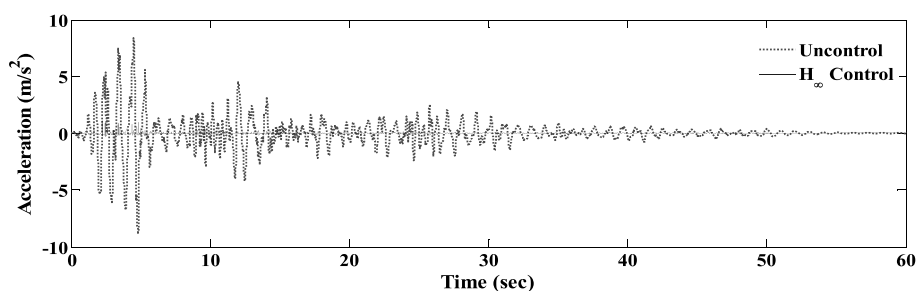
D_{1f} و D_{2f} هم به طور متناظر با خروجی‌های تعریف شده تنظیم شدند، سپس با تشکیل $\bar{B}_1$ ، $\bar{D}_{11}$ و $\bar{D}_{21}$ با توجه به این دینامیک مدل نشده کنترل کننده H_∞ ای مقاوم به آن طراحی می‌شود. در بخش ۸ مدل سازی نتایج حاصل از کنترل کننده H_∞ در مقایسه با کنترل H_∞ مقاوم در نظر گرفتن همراه با این دینامیک مدل نشده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۸- شبیه‌سازی عددی

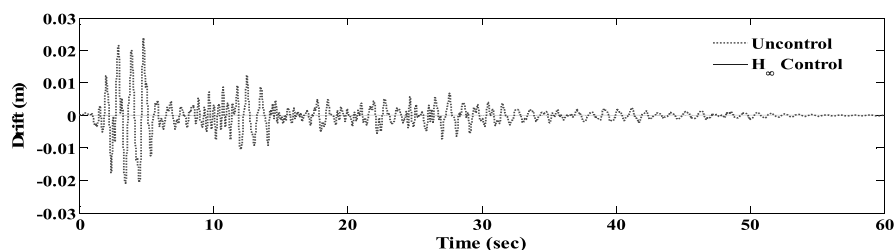
برای بررسی الگوریتم کنترلی طراحی شده مدل سازه را تحت زلزله السنترو (El Centro, 1940) در دو حالت بدون کنترلر و با کنترلر تحلیل شده است و نتایج حاصل از تحلیل را برای اهداف تنظیم خروجی و هماهنگ سازی در نمودارهای تاریخچه زمانی پاسخ سازه نمایش داده شده است. شکل ۸ تا شکل ۱۰ خروجی جابجایی شتاب و جابجایی نسبی طبقه پنجم سازه فوق را در دو حالت کنترل شده و نشده تحت زلزله السنترو نشان می‌دهد.



شکل (۸): نمودار تاریخچه زمانی جابجایی طبقه پنجم در دو حالت کنترل شده با الگوریتم H_{∞} و کنترل نشده تحت زلزله السنترو



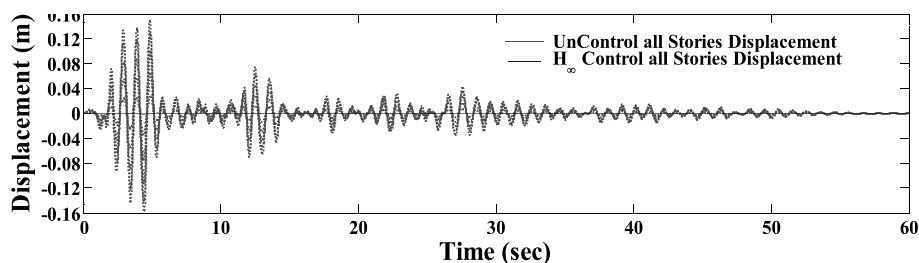
شکل (۹): نمودار تاریخچه زمانی شتاب طبقه پنجم در دو حالت کنترل شده با الگوریتم H_{∞} و کنترل نشده تحت زلزله السنترو



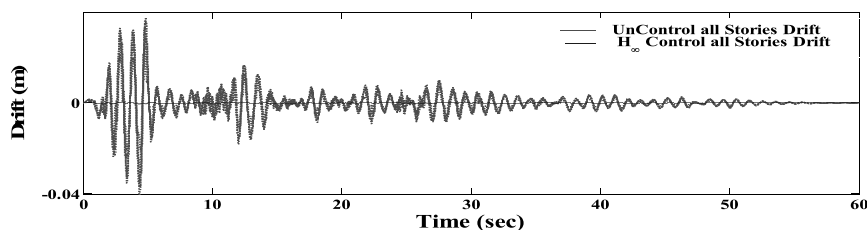
شکل (۱۰): نمودار تاریخچه زمانی جابجایی نسبی (دریفت) طبقه پنجم در دو حالت کنترل شده با الگوریتم H_{∞} و کنترل نشده، تحت زلزله السنترو

با توجه به شکل ۸ تا شکل ۱۰ به خوبی مشخص است که الگوریتم کنترلی پیشنهادی به خوبی توانسته است از ارتعاش بیش از حد سازه جلوگیری نماید و این امر سبب کاهش نیروهای داخلی سازه و همچنین کاهش خسارات وارد به سازه در هنگام وقوع زلزله می گردد. از سوی دیگر اهداف

کنترل هماهنگ ساز نیز علاوه بر تنظیم خروجی سازه با همگرا شدن E_c ، e به سمت صفر در حالی که $t \rightarrow \infty$ ، در شکل ۸ تا شکل ۱۰ تحت زلزله السنترو تأمین شده است. شکل ۱۱ جابجایی هر پنج طبقه را در حالت کنترل شده و کنترل نشده در یک گراف نشان می دهد. کاهش جابجایی طبقات و همگرا شدن آن ها به سمت صفر تحت عنوان خطای متغیر حالت برای تمام طبقات مانند طبقه پنجم حاصل گردید. شکل ۱۲ جابجایی نسبی (دریفت) هر پنج طبقه را در حالت کنترل شده و کنترل نشده در یک شکل را نشان می دهد. کاهش جابجایی نسبی طبقات و همگرا شدن آن ها به سمت صفر تحت عنوان خطای متغیر حالت برای تمام طبقات به مانند طبقه پنجم اتفاق افتاده است. با توجه به شکل های ۱۱ و ۱۲، همگرا شدن جابجایی و جابجایی نسبی به سمت صفر برای تمام طبقات بیانگر انتخاب مناسب روش کنترلی می باشد.

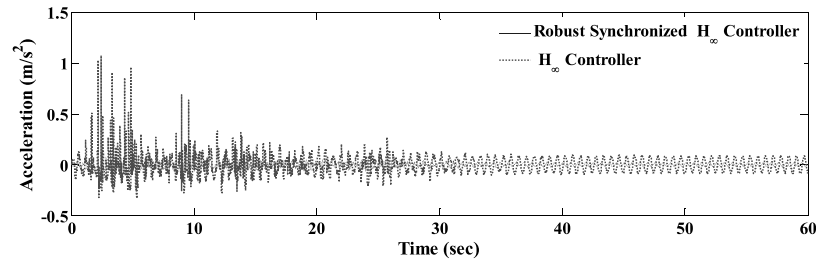


شکل (۱۱): جابجایی هر پنج طبقه در حالت کنترل شده با الگوریتم H_∞ و کنترل نشده تحت زلزله السنترو

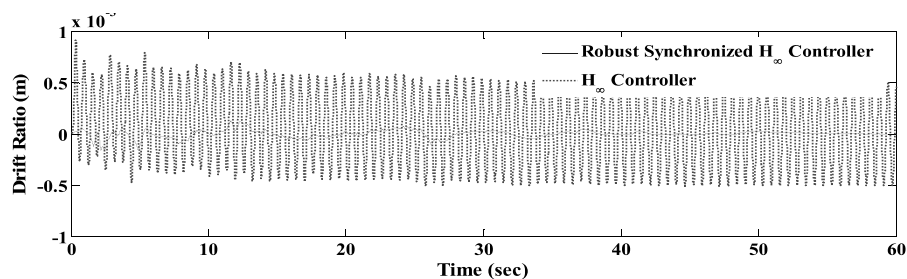


شکل (۱۲): جابجایی نسبی هر پنج طبقه در حالت کنترل شده با الگوریتم H_∞ و کنترل نشده تحت زلزله السنترو

در شکل های ۱۳ و ۱۴ شتاب و جابجایی نسبی طبقه پنجم را که با دو کنترل کننده H_∞ متفاوت مدل سازی شده است، تحت بار زلزله السنترو نشان می دهد، کنترل کننده اول (H_∞) بدون در نظر گرفتن دینامیک مدل نشده طراحی شده و نسبت به آن مقاوم نیست و کنترل کننده دوم (Robust Synchronized H_∞) نسبت به دینامیک مدل نشده مقاوم می باشد.

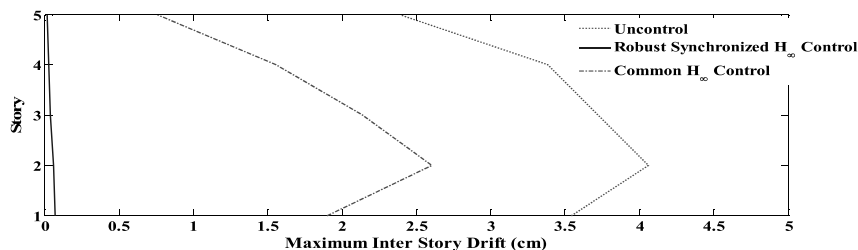


شکل (۱۳): نمودار تاریخچه زمانی شتاب طبقه پنجم در دو حالت با کنترل کننده H_∞ و کنترل کننده H_∞ مقاوم تحت زلزله السنترو

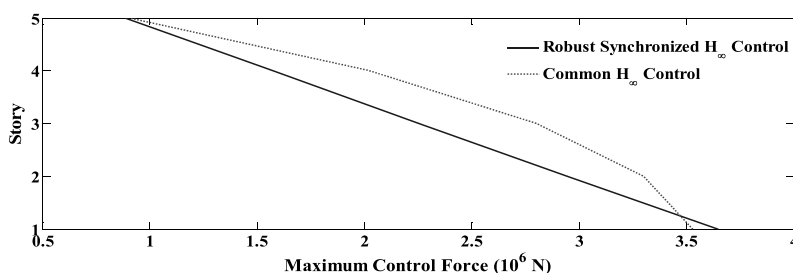


شکل (۱۴): نمودار تاریخچه زمانی دررفت طبقه پنجم در دو حالت با کنترل کننده H_∞ و کنترل کننده H_∞ مقاوم تحت زلزله السنترو

همان طور که در شکل های ۱۳ و ۱۴ دیده می شود، کنترل کننده H_∞ مقاوم کاملاً اثر دینامیک ناشناخته را توانسته تعدیل نماید. این در حالی است که در پاسخ سیستم کنترلی با کنترل کننده H_∞ (نوع اول) تأثیر دینامیک مدل نشده کاملاً دیده می شود. این تأثیر در مقایسه با پاسخ بدون کنترل مدل بسیار کوچک گردیده است. هر چند در این مقاله نشان دادیم (نگاه کنید به شکل های ۱۳ و ۱۴) که با طراحی الگوریتم کنترلی مقاوم، تأثیرات فوق به سمت صفر میل می کند. برای به دست آوردن مزیت کنترل کننده ها، ماکزیمم تغییر شکل نسبی طبقات را با کنترل هماهنگ ساز H_∞ و کنترل H_∞ و سیستم بدون کنترل به دست آورده و نتایج را به صورت شکل ۱۵ نشان داده شده است. ماکزیمم نیرو کنترلی طبقات مورد نیاز را با کنترل هماهنگ ساز H_∞ و کنترل H_∞ را به دست آورده و نتایج را به صورت شکل ۱۶ ارائه می گردد (با مقیاس ۳/۴۱۷ به ۱). در شکل ۱۷ مقایسه تاریخچه زمانی نیروی کنترلی در طبقه پنجم با کنترل مقاوم هماهنگ ساز H_∞ و کنترل H_∞ تحت زلزله السنترو را نشان می دهد. با توجه به شکل ۱۵، ۱۶ و ارجحیت کنترل هماهنگ ساز H_∞ به کنترل H_∞ را نشان می دهد.



شکل (۱۵): ماکزیمم تغییر مکان نسبی طبقات با کنترل هماهنگ ساز H_∞ ، کنترل H_∞ و بدون کنترل تحت زلزله السنترو



شکل (۱۶): ماکزیمم نیرو کنترلی طبقات با کنترل هماهنگ ساز H_∞ و کنترل H_∞ تحت زلزله السنترو

شکل (۱۷): مقایسه تاریخچه زمانی نیروی کنترلی در طبقه پنجم با کنترل مقاوم هماهنگ ساز H_∞ و کنترل H_∞ تحت زلزله السنترو

۹- نتیجه گیری و مقایسه

در این مقاله فرمول بندی به طور کاربردی و شبیه سازی ریاضی برای حل مسئله کنترل هماهنگ برای سازه های تحت زلزله انجام پذیرفت. مطالعه یک سیستم کنترلی هماهنگ ساز با الگوریتم H_∞ برای یک ساختمان پنج طبقه طراحی و سپس کارایی آن ارزیابی گردید. محاسبات عددی که با تعریف خطای متغیر حالت و خطای هماهنگ سازی در خروجی های تنظیم شده می توان به خوبی اهداف الگوریتم کنترل هماهنگ ساز را تأمین نموده و علاوه بر آن با تنظیم این دو خطا مقادیر شتاب و جابجایی نسبی هر طبقه نیز کاهش می یابد که به طبع آن مقادیر، نیروی وارد به طبقه و نیروهای داخلی سازه نیز کاهش خواهد یافت. از سوی دیگر الگوریتم H_∞ این امکان را

برای طراحی فراهم می‌سازد که حتی با وجود دینامیک مدل نشده در سیستم، پایداری و عملکرد سیستم را در حد بسیار مطلوبی حفظ نماید. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که باهمانگی‌سازی مناسب تنظیم خروجی تا حد بسیار زیادی می‌توان سازه را در برابر آسیب ایمن نگاه داشت و از خسارات جانی و مالی ناشی از زلزله جلوگیری نمود. جدول شماره ۱ مقایسه‌ای بین جابجایی‌های نسبی طبقات در استفاده از روش‌های مختلف را ارائه می‌نماید. همانطوری که مشاهده می‌گردد، حتی با وجود دینامیک ناشناخته $f(t) = 0.2 \sin(10t)$ ، تغییرات جابجایی نسبی در سازه، کار آبی روش‌های سیستم هماهنگ‌ساز کنترل H_∞^1 و سیستم مقاوم کنترل H_∞^2 نسبت به روش سیستم بدون کنترل^۳ و روش با سیستم کنترل هماهنگ‌ساز H_2/LQG بدون دینامیک ناشناخته، به مراتب بهتر می‌باشند. در جدول شماره ۱ ماکزیمم تغییر مکان نسبی طبقات با شرایط مختلف کنترلی تحت زلزله السنترو آمده است،

جدول (۱): ماکزیمم تغییر مکان نسبی طبقات با شرایط مختلف کنترلی تحت زلزله السنترو (میلی‌متر)

وضعیت طبقه	-Un control	Synchronized H_2/LQG بدون دینامیک ناشناخته	Synchronized H_∞ با دینامیک ناشناخته	Robust Synchronized H_∞ با دینامیک ناشناخته
اول	۳۶	۱۸	۱۲	۱
دوم	۴۱	۱۹	۸	۰/۸
سوم	۳۷	۱۷	۶	۰/۷
چهارم	۳۲	۱۵	۴	۰/۵
پنجم	۲۵	۱۰	۳	۰/۱

مراجع

- [1] Aldemir, U. Arcan, Y. and Mehmet, B. (2012). Control of Structural Response Under Earthquake Excitation, *Computer- Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **27**, 620-638.

- 1- Synchronized H_∞ controller
 2- Robust Synchronized H_∞ controller
 3 - Un-control
 4 - Synchronized H_2/LQG controller

- [2] Sundaram, S., Sriram, N. and Satish, N. (2012). Direct adaptive neural controller for the active control of earthquake-excited nonlinear base-isolated, *Structural Control and Health Monitoring*, **19**, 370 – 384.
- [3] Jiang, Jin. and De, YD. (2012). Motion planning and synchronized control of the dental arch generator of the tooth - arrangement robot. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, **9**, 94 – 102.
- [4] Yoram, Koren. (1980). Cross - Coupled Biaxial Computer Controls for Manufacturing *Dynamic Systems Measurement and Control*, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, **102**, 265 – 272.
- [5] Kulkarni, P.K. and Srinivasan, K. (1985). Cross Coupled Compensators for Contouring Control of Multi-Axial Machine Tools, in Proceedings of the 13 th North American Manufacturing.
- [6] Koren, Y. and Lo, Ch. (1991). Variable- Gain Cross - Coupling Controller for Contouring. *Annal of CIRP*, **40**, 371 – 374.
- [7] Sun, D. (2004). Adaptive Coupling Control of Two Working Operations in CNC Integrated Machines, *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, **125**, 662 – 665.
- [8] Sun, D. Feng, G. Lam, C. M. and Dong, H. (2005). Orientation control of a differential mobile robot through wheel synchronization, *IEEE /ASME Transactions on Mechatronics* **10**, 345 – 351.
- [9] Sun, D. and Tong, M. C. (2009). A Synchronization Approach for the Minimization of Contouring Errors of CNC Machine Tools. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **6**, 720 – 729.
- [10] Jiang, J. G. and Zhang, Y.D. (2012). Motion planning and synchronized control of the dental arch generator of the tooth-arrangement robot, *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, **9**, 94 - 102.
- [11] Zhao, D., Zhu, Q. Li, S. and Gao, F. (2013). Synchronized Control of Mechanical Systems: A Tutorial. *Applied Methods and Techniques for Mechatronic Systems*, Springer Berlin Heidelberg, 1-25.
- [12] Mesbahi, J. and Malak, A. (2015). Synchronized Control for Five-Story Building under Earthquake Loads. *Journal of Applied Mathematics*. Article ID 507306.

-
- [13] Sun, Dong. (2010). *Synchronization and Control of Multi-agent systems*: CRC Press, New York, NY, USA.
- [14] Alma, Marouane. Martinez, J. Ioan, D. Landau. And Buche, G. (2011). Design and Tuning of Reduced Order H_{∞} Feedforward Compensators for Active Vibration Control. *Control Systems Technology, IEEE Transactions*, **20**, 554 - 561.
- [15] Gawronski, and Wodek, K. (2004). *Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures*. New York: Springer.
- [16] Zhou, K. and Doyle, J C. (1998). *Essentials of robust control*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- [17] Moghaddam, H. (2002). *Earthquake Engineering Theory and Application*. Tehran: Frahang
- [18] Rubió, M. Palacios, J. Quiñero, J. and Rossell, M. (2011). Decentralized static output feedback H_{∞} controller design for buildings under seismic excitation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **41**, 1199-1205.
- [19] Kurata, N. Kobori, T. Takahashi, M. Niwa, N. and Midorikawa, H. (1999). Actual seismic response controlled building with semi active damper system. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **28**, 1427 - 1447.

H_∞ Technique for Five Story Buildings Under Seismic Loads and Uncertainty Process Using Synchronized Control

Javad Mesbahi* and Alaeddin Malek**

*Department of Civil, Payame Noor University, Tehran, Iran

**Department of Applied Mathematics, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, synchronized control is used for five story structure of Kajima Shizuoka under the EL - Centro earthquake load (1940) seismic record. According to coupled values of displacement, drift and position error the related partial differential equation for motion and state is solved successfully. The Riccati equation is solved based on the close loop transfer function with respect to uncertainty parameters and random dynamic processes. Numerical simulations along with comparisons are made to evaluate the efficiency of this hybrid technique.

Keywords: Synchronized Control, H_∞ control, Random dynamic, Riccati Equation.

Mathematics Subject Classification (2010): 37H99, 34H05.