



مروری بر الگوریتم کنترل بهینه آنی یانگ

امید بهار، استادیار پژوهشکده مهندسی سازه پژوهشگاه

۱- چکیده

اولین بار در دهه پنجاه میلادی توسط کوبوری مطرح شده است [۱]. از آن زمان تاکنون محققین زیادی به صورت تحلیلی یا آزمایشگاهی بر روی آن کار کرده‌اند. امروزه در ژاپن ساختمانهای بلند و برجهای زیادی مجهز به ساز و کارهای کنترل فعال هستند.

یک سیستم فعال از دو بخش عمده ساز و کار کنترل و الگوریتم کنترل تشکیل شده است. تا به حال ساز و کارهای کنترلی زیادی معرفی شده‌اند که برای نمونه میراگر جرم فعال (AMD) یکی از مهمترین آنهاست. از طرف دیگر، عملکرد مناسب یک سیستم کنترل تا اندازه زیادی به الگوریتم کنترل مورد استفاده بستگی دارد. از دیدگاه علمی یک الگوریتم کنترلی باید قانونی ساده و در عین حال پایدار داشته باشد. از سال ۱۹۷۲ که یائو [۲] برای اولین بار مفاهیم کنترل سازه‌ای را بر مبنای تئوری کنترل مدرن بیان نمود، تاکنون الگوریتم‌های زیادی از جمله کنترل بهینه کلاسیک، کنترل بهینه آنی یانگ، کنترل بهینه آنی بر مبنای روش ویلسون- θ [۳]، کنترل بهینه آنی گسسته [۴ و ۵]، تخصیص قطب، کنترل فضای مدی ناپیوسته، کنترل وضعیت محدود شده، کنترل مد لغزش، کنترل هوشمند و غیره مطرح شده‌اند. از میان این الگوریتم‌ها،

الگوریتم کنترل بهینه آنی روشی قدرتمند برای کنترل سازه‌هایی است که تحت اثر بارهای پیش‌بینی نشده مانند بادهای شدید یا زلزله قرار گرفته‌اند؛ اما این الگوریتم نسبت به گامهای زمانی انتخاب شده برای تحلیل بسیار حساس است. از طرف دیگر، یافتن یک ماتریس وزن مناسب برای آن نیز چندان ساده نیست. در این مقاله ابتدا روشی ساده، مستقیم و منسجم برای یافتن روابط کنترل بهینه آنی ارائه شده و سپس مشکل گام زمانی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، نشان داده شده است که در این روش فقط روابط کنترل حلقه بسته قابل دستیابی است و روابط کنترل حلقه باز و کنترل حلقه باز - بسته معنی دار نیستند. برای تشریح کارایی سیستم کنترل بهینه آنی در مقایسه با دیگر روشهای کنترل بهینه از یک سازه هشت طبقه برشی مجهز به یک سیستم میراگر جرم فعال (AMD) استفاده شده است.

کلیدواژه‌ها: کنترل بهینه آنی، کنترل کلاسیک، میراگر جرم فعال، کنترل حلقه بسته

۲- مقدمه

ایده جالب توجه سازه‌های مجهز به سیستم‌های کنترل فعال

(AMD) تحت نیروی حاصل از شتاب لرزه‌ای زمین $\ddot{x}_0(t)$ قرار گیرد. معادلات حرکت کل سیستم سازه‌ای (خصوصیات توأم ساختمان و سیستم کنترل فعال) را می‌توان به صورت یک سیستم n درجه آزادی خطی به شکل رابطه (۱) بیان نمود:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = Du(t) + Me\ddot{x}_0(t) \quad (1)$$

در این رابطه، M ، C و K به ترتیب ماتریس‌های $n \times n$ جرم، میرایی و سختی هستند. پارامترهای $x(t)$ ، $\dot{x}(t)$ و $\ddot{x}(t)$ نیز به ترتیب بردارهای n بعدی جابه‌جایی نسبی، سرعت نسبی و شتاب نسبی مربوط به درجات آزادی سازه و جرمهای فعال هستند. ماتریس D یک ماتریس $n \times r$ است که موقعیت قرارگیری r کنترل‌کننده فعال را مشخص می‌کند و بردار r بعدی $u(t)$ بردار نیروهای کنترل متناظر با آنهاست. بردار e ، بردار n بعدی با اعضای (-1) است که تأثیر شتاب زمین بر جرمهای سازه و سیستم کنترل فعال را بیان می‌کند. معادله پیوسته مرتبه اول حالت برای این سیستم سازه‌ای چنین است:

$$\dot{Z}(t) = AZ(t) + Bu(t) + w_1 x_0(t), \quad Z(t_0) = Z_0 \quad (2)$$

در رابطه (۲)، t_0 زمان اولیه، $Z(t)$ بردار وضعیت و A ماتریس سیستم نامیده می‌شوند و به صورت رابطه (۳) تعریف می‌گردند:

$$Z = [x(t) \quad \dot{x}(t)]^T, \quad A = \begin{bmatrix} O_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (3)$$

ماتریس B و بردار w_1 نیز به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شوند:

$$B = [O_{n \times r} \quad M^{-1}D]^T, \quad w_1 = [O_{n \times r} \quad e]^T \quad (4)$$

معادله (۲) جهت سادگی می‌تواند به شکل رابطه (۵) نوشته شود:

$$\dot{Z}(t) = AZ(t) + f(t) \quad (5)$$

$f(t)$ نیز برابر است با:

$$f(t) = Bu(t) + w_1 \ddot{x}_0(t) \quad (6)$$

حل رابطه (۵) همیشه موجود است و می‌تواند چنین بیان شود:

$$Z(t) = \varphi(t - t_0)Z_0 + \int_{t_0}^t \varphi(t - \tau)f(\tau)d\tau \quad \text{for } t > t_0 \quad (7)$$

روشهای بهینه به دلیل سادگی عملکرد و آسان بودن اعمال آنها در سیستم‌های سازه‌ای بزرگ و پیچیده از محبوبیت بیشتری برخوردارند. الگوریتم کنترل بهینه کلاسیک علی‌رغم عملکرد قابل قبول در پژوهشهای تئوری و تجربی کاستی‌هایی نیز دارد که در مرجع [۶] به آنها اشاره شده است.

در سال ۱۹۸۵ میلادی، یانگ، اکبرپور و قائم مقامی [۷] الگوریتم کنترل بهینه آنی را به منظور رفع نقصهای روش کنترل بهینه کلاسیک پیشنهاد نمودند؛ اما این الگوریتم نسبت به گامهای زمانی بسیار حساس است. همچنین انتخاب یک ماتریس وزن مناسب برای آن کار چندان ساده‌ای نیست [۷ و ۸]. یانگ و همکاران [۹] در سال ۱۹۹۲ برای افزایش کارایی این الگوریتم با استفاده از روش مستقیم لیاپانوف، ماتریس وزن پایداری را معرفی نمودند.

در مقاله حاضر، روابط کنترل بهینه آنی با استفاده از یک روش ساده، مستقیم و منسجم بر اساس معادلات حالت، مجدداً به دست آمده و نشان داده شده است که شاخه‌های حلقه بسته، حلقه باز و حلقه باز - بسته در این روش از هم مستقل نیستند. سپس با کمک گرفتن از یک سازه هشت طبقه برشی مجهز به یک ساز و کار میراگر جرم فعال که توسط یانگ و همکاران [۷ و ۸] مورد استفاده قرار گرفته، مشکل گام زمانی، دقت نتایج روش و کارایی سیستم کنترل نسبت به دیگر الگوریتم‌های کنترل بهینه مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور داشتن مبنای یکسانی برای مقایسه نتایج الگوریتم‌های مختلف، نیروی کنترل مصرفی در کلیه تحلیل‌ها به یک مقدار ثابت محدود شده است.

۳- گسسته‌سازی معادلات حالت

فرض کنید سازه‌ای مجهز به سیستم میراگر جرم فعال

۴ - الگوریتم کنترل بهینه آنی

یانگ و همکاران [۷ و ۸] برای پرهیز از حل معادله ریکاتی و رهایی قانون کنترل از وابستگی به کل تاریخچه زمانی شتاب زمین، شاخص عملکردی آنی را به شکل رابطه (۱۴) پیشنهاد نمودند:

$$J(t) = Z(t)^T QZ(t) + u(t)^T Ru(t) \quad (14)$$

در این رابطه، ماتریس Q یک ماتریس وزن $2n \times 2n$ نیمه مثبت وابسته به پاسخهای درجات آزادی سیستم سازه‌ای و ماتریس R یک ماتریس وزن $r \times r$ قطعاً مثبت وابسته به نیروهای کنترلی فعال است. برای حداقل نمودن شاخص عملکرد آنی $J(t)$ با توجه به قید معادله حرکت گسسته سیستم در معادله (۱۳)، تابع لاگرانژ به شکل رابطه (۱۵) خواهد بود:

$$L(t) = Z(t)^T QZ(t) + u(t)^T Ru(t) + \lambda(t)^T \left[Z(t) - g(t - \Delta t) - \frac{\Delta t}{2} [Bu(t) + w_1 \ddot{x}_o(t)] \right] \quad (15)$$

در رابطه (۱۵)، $\lambda(t)$ بردار ضریب لاگرانژ است و می‌تواند با زمان تغییر کند. به منظور یافتن شرایط لازم برای حداقل شدن تابع لاگرانژ $L(t)$ ، مشتق آن نسبت به متغیرهای مکانی $Z(t)$ و نیروی کنترلی $u(t)$ محاسبه می‌شود. نتایج به صورت رابطه‌های (۱۶) و (۱۷) به دست می‌آیند:

$$2QZ(t) + \lambda(t) = 0 \quad (16)$$

$$u(t) = \frac{\Delta t}{4} R^{-1} B^T \lambda(t) \quad (17)$$

با قراردادن مقدار $\lambda(t)$ از معادله (۱۶) در معادله (۱۷) نیروی کنترلی فعال محاسبه می‌گردد:

$$u(t) = -\frac{\Delta t}{2} R^{-1} B^T QZ(t) \quad (18)$$

با توجه به معادله (۱۸) حساسیت نیروی کنترلی نسبت به تغییرات گام زمانی محاسباتی به وضوح قابل مشاهده است. از طرف دیگر، معادله (۱۶) رابطه خاص و منحصر به فرد حلقه

در رابطه (۷)، $\varphi(t - \tau) = \exp[A(t - \tau)]$ فرض کنید در لحظه اولیه زمان $t_0 = 0$ ، سازه در حال سکون باشد. در این صورت معادله (۷) به شکل ساده‌تر رابطه (۸) تبدیل می‌شود:

$$Z(t) = \exp(At) \int_0^t \exp(-A\tau) f(\tau) d\tau \quad (8)$$

حال رابطه (۸) برای یک گام زمانی قبل تر نوشته می‌شود:

$$\exp(A\Delta t) Z(t - \Delta t) = \exp(At) \int_0^{t-\Delta t} \exp(-A\tau) f(\tau) d\tau \quad (9)$$

چنانچه معادله (۹) از معادله (۸) کسر گردد:

$$Z(t) = \exp(A\Delta t) Z(t - \Delta t) + \exp(At) \int_{t-\Delta t}^t \exp(-A\tau) f(\tau) d\tau \quad (10)$$

به منظور محاسبه انتگرال معادله (۱۰) از قاعده ذوزنقه استفاده می‌شود:

$$Z(t) = \exp(A\Delta t) \left[Z(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} f(t - \Delta t) \right] + \frac{\Delta t}{2} f(t) \quad (11)$$

با قراردادن $f(t)$ از معادله (۶) در معادله (۱۱)، پارامتر جدیدی به نام $g(t - \Delta t)$ به شکل (۱۲) معرفی می‌شود:

$$g(t - \Delta t) = \exp(A\Delta t) \left[Z(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} [Bu(t - \Delta t) + w_1 \ddot{x}_o(t - \Delta t)] \right] \quad (12)$$

با قراردادن این پارامتر در معادله (۱۱)، شکل کلی گسسته معادله حالت (۲) به صورت رابطه (۱۳) به دست می‌آید:

$$Z(t) = g(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} [Bu(t) + w_1 \ddot{x}_o(t)] \quad (13)$$

شایان ذکر است که معادله (۱۳) همان فرم گسسته‌ای است که توسط یانگ و همکاران [۷ و ۸] معرفی شده است. شکل $g(t - \Delta t)$ که در معادله (۱۲) تعریف شده است، همان $TD(t - \Delta t)$ شکل در مراجع [۷] و [۸] است. این روند کاملاً مستقیم و منسجم بوده و به سادگی می‌تواند شرایط اولیه غیر صفر Z_0 ، یا اختصاص زمان اولیه غیر صفر (t_0) ، در آن ملحوظ گردد. در عین حال می‌توان دریافت که تقریب وارد شده در این روش نسبت به روش کنترل دیجیتال، استفاده از قاعده ذوزنقه در محاسبه انتگرال معادله (۱۰) است.

بسته میان $\lambda(t)$ و $Z(t)$ را نشان می‌دهد. یانگ و همکاران [۷ و ۸] دو رابطه دیگر برای $\lambda(t)$ براساس تحریک خارجی و پاسخهای سازه‌ای به‌عنوان حلقه باز و حلقه باز - بسته معرفی نموده‌اند؛ اما براساس روند طی شده و صراحت معادله (۱۶) می‌توان دریافت که تعریف هر گونه رابطه دیگری برای $\lambda(t)$ برحسب بارخارجی غیرصحیح است. این مسأله توسط نتایج عددی به‌دست آمده در این مقاله و در مراجع [۷] و [۸] نیز مورد تأیید قرار می‌گیرد.

۵- نتایج عددی

یک ساختمان هشت طبقه برشی که جرم، سختی و میرایی هر طبقه آن به ترتیب $۳۴۵/۶$ تن، $۳/۴۰۴ \times ۱۰^۵$ کیلو نیوتن بر متر و ۲۹۳۷ تن بر ثانیه است تحت تحریک نگاشت زلزله ال سنتر و قرار گرفته است. ساز و کار کنترل فعال آن یک سیستم میراگر جرم فعال (AMD) است که در بالاترین طبقه ساختمان نصب شده است. میراگر مذکور با جرم $۲۹/۶۳$ تن، فرکانس ۹۸ درصد فرکانس اول ارتعاش ساختمان، میرایی ۲۵ تن بر ثانیه و ضریب میرایی تقریباً $۷/۳$ درصد می‌باشد. با توجه به نصب سیستم AMD در بالاترین طبقه بردار جابه‌جاییهای نسبی درجات آزادی کل سیستم سازه‌ای به صورت رابطه (۱۹) تعریف می‌شود:

$$x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_8 \ x_m]^T \quad (19)$$

در این رابطه، x_i ها و x_m به ترتیب جابه‌جایی طبقه i ام و جرم محرک است.

۶- نقش گام زمانی Δt

برای دستیابی به مناسبترین Δt برای همگرایی معادله حرکت، چهارگام مختلف زمانی در محدوده یک دوم تا یک

بیستم آخرین پیوند ساختمان که $۰/۱$ ثانیه است بررسی شد (جدول ۱). در این جدول نتایج حداکثر جابه‌جایی و شتاب ساختمان در حالت بدون کنترل، کنترل غیرفعال و کنترل فعال با هم مقایسه شده‌اند. نتایج مربوط به حالت‌های بدون کنترل و کنترل غیرفعال مبین آن است که گام زمانی مناسب $۰/۰۲$ ثانیه یا معادل یک پنجم بزرگترین پیوند ساختمان است. گام زمانی بزرگتر (نسبت به گامهای زمانی متداول در حل عددی معادلات حرکت) به دلیل استفاده از معادله مرتبه اول حالت می‌باشد.

جدول (۱): پاسخهای حداکثر سازه هشت طبقه برشی در حالت بدون کنترل، کنترل غیرفعال و کنترل فعال با استفاده از روش کنترل بهینه آنی نسبت به گامهای زمانی مختلف

گام زمانی (ثانیه)	بدون کنترل		کنترل غیرفعال		کنترل فعال	
	شتاب جابه‌جایی (سانتیمتر بر مجذور ثانیه)	شتاب جابه‌جایی (سانتیمتر بر مجذور ثانیه)	شتاب جابه‌جایی (سانتیمتر بر مجذور ثانیه)	شتاب جابه‌جایی (سانتیمتر بر مجذور ثانیه)	شتاب جابه‌جایی (سانتیمتر بر مجذور ثانیه)	شتاب نیروی کنترل (کیلو نیوتن)
۰/۰۵	۱۹/۳	۷/۸۵	۱۵/۰	۶/۳۱	۸/۰	۵/۱۳
۰/۰۲	۱۹/۳	۷/۹۱	۱۵/۲	۶/۴۰	۹/۷	۴/۹۴
۰/۰۱	۱۹/۲	۷/۹۱	۱۵/۲	۶/۳۹	۱۱/۱	۵/۲۳
۰/۰۰۵	۱۹/۲	۷/۹۱	۱۵/۲	۶/۳۹	۱۲/۴	۵/۴۵

برای تحلیل سازه در مدکنترل، طراح باید آرایه مناسبی برای ماتریس وزن بیاید تا بهترین کارایی سیستم کنترلی به‌دست آید. به‌عنوان یک انتخاب قابل قبول، ماتریس وزن معرفی شده توسط یانگ و همکاران مورد استفاده قرار گرفته است [۷ و ۸]. این ماتریس یک ماتریس غیرمقارن است؛ اما از آنجاکه شرط تقارن ماتریس Q در هنگام مشتق‌گیری از تابع لاگرانژ $L(t)$ ، رابطه (۱۵)، به‌طور غیرمحسوس در روابط مورد استفاده قرار گرفته است، در اینجا نیز این ماتریس به صورت مقارن در محاسبات منظور شده است.

در بیشتر روشهای عددی موجود برای حل معادله دینامیکی حرکت، کاهش گام زمانی Δt اگرچه هزینه‌های محاسباتی را افزایش می‌دهد، باعث افزایش دقت و به‌دست آوردن نتایج

۸- مقایسه روش کنترل بهینه آنی با دیگر روشهای کنترل بهینه

به منظور ارزیابی عملکرد سیستم کنترل فعال که از روش کنترل بهینه آنی استفاده می‌کند، نتایج پاسخهای سازه با مقادیر متناظر به دست آمده از دوروش حلقه بسته و حلقه باز - بسته در کنترل بهینه کلاسیک مقایسه شده است. ماتریس وزن در روش بهینه کلاسیک به صورت معادله (۲۰) تعریف شده است:

$$Q = \alpha \begin{bmatrix} L & O_{9 \times 9} \\ O_{9 \times 9} & L \end{bmatrix} \text{ where } L = \begin{bmatrix} I_{8 \times 8} & O_{8 \times 1} \\ O_{1 \times 8} & O \end{bmatrix} \quad (20)$$

در این معادله، α برای روش حلقه بسته ۱۴۹۹/۱۴ و برای روش حلقه باز - بسته ۳۷۳۰ می‌باشد. این پارامترها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که نیروی کنترل متوسط لازم برای همه روشها مقدار ثابت ۷۲/۶۸ کیلو نیوتن باشد. مقدار نیروی کنترل متوسط از رابطه (۲۱) به دست آمده است:

$$ACF = \frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} |u(t)| dt \quad (21)$$

در این رابطه، t_f زمان خاتمه کنترل سازه می‌باشد. برای روش کنترل بهینه آنی دو ماتریس وزن متفاوت انتخاب شده است. اولین آنها ماتریس وزن یانگ است که به شکل متغیر در آمده است و ضریب a در آن برابر با ۲۵/۲۷۱ می‌باشد [۸ و ۷]. دومین آنها ماتریس وزن پایدار است [۹]. برای یافتن این ماتریس، ابتدا یک ماتریس نیمه مثبت انتخاب می‌شود. سپس معادله ماتریسی ریکالی حل شده و ماتریس وزن پایدار به دست می‌آید. ماتریس نیمه مثبت در این حالت به شکل رابطه (۲۲) تعریف شده است:

$$I_0 = \begin{bmatrix} \alpha K_\gamma & O_{9 \times 9} \\ O_{9 \times 9} & \beta M \end{bmatrix} \text{ where } K_\gamma = \begin{bmatrix} K_{11}(8 \times 8) & K_2(8 \times 1) \\ K_{21}(1 \times 8) & \gamma \end{bmatrix} \quad (22)$$

بهتر می‌شود. در این روش نیز به منظور افزایش دقت در محاسبه انتگرال معادله (۱۰)، باید Δt کاهش یابد؛ اما از طرف دیگر، بر اساس معادله (۸) با انتخاب Δt کوچکتر، اگرچه $Z(t)$ افزایش می‌یابد، نیروی مؤثر کنترلی را کاهش می‌دهد (ستون آخر جدول ۱). کاهش نیروی کنترلی نیز مستقیماً بر روی کارایی سیستم کنترلی اثر می‌کند؛ به طوری که جابه‌جایی و شتاب حداکثر سازه افزایش می‌یابد (ستونهای ۶ و ۷ جدول ۱). به همین دلیل، کاهش گام زمانی در روش کنترل بهینه لحظه‌ای نمی‌تواند تعیین کننده دستیابی به بهترین کارایی سیستم کنترلی باشد. این پدیده ویژگی ذاتی این روش است؛ به طوری که روشهای کنترل بهینه کلاسیک، با چنین مشکلی مواجه نیستند.

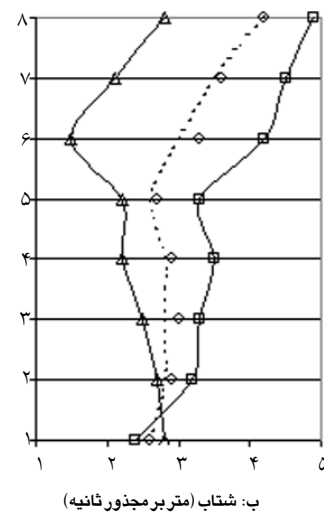
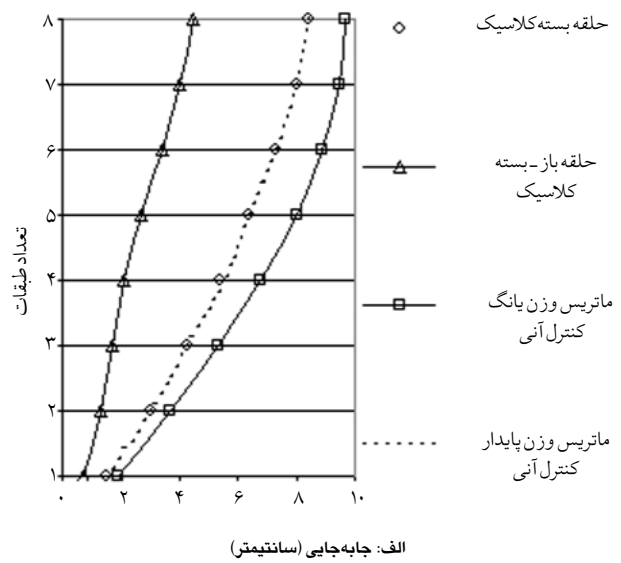
۷- بررسی شاخه‌های مختلف روش کنترل بهینه آنی

یانگ و همکاران [۷ و ۸] سه قانون کنترلی برای حلقه بسته، حلقه باز و حلقه باز - بسته در روش کنترل بهینه آنی پیشنهاد نموده‌اند؛ اما از معادلات (۱۶) و (۱۷) بوضوح قابل مشاهده است که نیروی کنترل $u(t)$ فقط می‌تواند به بردار وضعیت $Z(t)$ وابسته باشد. به عبارت دیگر، هر سه قانون کنترلی معرفی شده توسط یانگ و همکاران در اصل یکی هستند [۷ و ۸]. این مطلب با محاسبات عددی، ارائه شده در جدول (۲) نیز تأیید می‌شود.

جدول (۲): مقایسه شاخه‌های مختلف در روش کنترل بهینه آنی

عنوان شاخه	پاسخ‌های طبقه هشتم		پاسخهای جرم محرک		حد اکثر درصد کاهش نیروی کنترل (کیلو نیوتن)
	جابه‌جایی (سانتیمتر)	شتاب بر مجذور (ثانیه)	جابه‌جایی (متر)	شتاب (سانتیمتر بر مجذور ثانیه)	
حلقه بسته	۹/۷	۴/۹	۱/۷۲*	۶۴/۳	۴۲/۶
حلقه باز	۹/۷	۴/۹	۱/۷۲*	۶۴/۳	۴۲/۶
حلقه باز - بسته	۹/۷	۴/۹	۱/۷۲*	۶۴/۳	۴۲/۶

در این رابطه، K_{ij} در ماتریس K_{γ} مقادیر متناظر از ماتریس سختی کل سازه هستند و فقط به جای ترم سختی جرم محرک از یک ضریب کوچکتر اختیاری (γ) استفاده شده است. ضرایب a و b نیز به گونه‌ای اختیار شده اند که حداکثر کارایی سیستم کنترلی با توجه به ثابت بودن نیروی کنترلی متوسط به دست آید. بر این اساس، ضرایب α ، β و γ به ترتیب $۸۷۶/۲$ ، ۱۰۰ و ۲۱ به دست آمده اند. از آنجاکه نیروی کنترل مصرفی کلیه روش‌های یکسان است می‌توان بازدهی سیستم‌های کنترلی را با هم مقایسه نمود. نتایج به دست آمده در شکل (۱) و جدول (۳) منعکس شده است.



شکل (۱): مقایسه پاسخ جابه‌جایی و شتاب حداکثر طبقات به دست آمده از روش‌های مختلف کنترل بهینه

با توجه به شکل (۱)، به نظر می‌رسد روش حلقه باز - بسته کنترل بهینه کلاسیک بیشترین بازدهی را در کاهش جابه‌جایی و شتاب حداکثر سازه دارد. فقط شتاب حداکثر طبقه اول سازه اندکی افزایش یافته که دلیل آن محدودیت زیاد جابه‌جایی در طبقات بالاتر است. در عین حال، نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد که پاسخهای جرم محرک و نیروی کنترلی حداکثر لازم در این روش نیز در مقایسه با روش‌های دیگر مقادیر قابل توجهی دارد. البته این روش به دلیل نیاز به کل تاریخچه زمانی در ابتدای محاسبات نمی‌تواند یک روش عملی برای کنترل سازه‌ها در هنگام زلزله باشد. در روش حلقه بسته کنترل بهینه کلاسیک، پاسخهای سازه‌ای به مقدار قابل قبولی کاهش یافته اند (در مقایسه با نتایج سیستم بدون کنترل و سیستم کنترل غیرفعال در جدول (۱)).

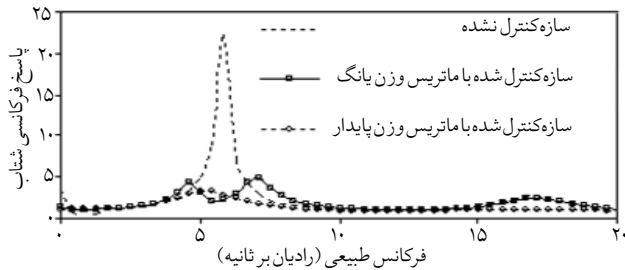
جدول (۳): مقایسه پاسخهای جرم محرک، حداکثر نیروی کنترلی و حداکثر درصد کاهش برش پایه در روش‌های مختلف کنترل بهینه

حداکثر درصد کاهش برش پایه (%)	حداکثر نیروی کنترل لازم (کیلو نیوتن)	پاسخهای جرم محرک			روشهای کنترل بهینه	
		شتاب (متر بر ثانیه مجذور ثانیه)	سرعت (متر بر ثانیه)	جابه‌جایی (متر)		
۵۲/۹	۶۶۷	۴۸/۸	۸/۲۹ *	۱/۴۴ *	حلقه بسته	کلاسیک
۷۷/۶	۴۸۸	۶۸/۶	۱۰/۱۱ *	۱/۵۸ *	حلقه باز - بسته	
۴۲/۶	۶۵۵	۶۴/۳	۱۰/۷۲ *	۱/۷۲ *	ماتریس وزن یانگ	لحظه‌ای
۵۳/۱	۶۳۷	۵۰/۷	۷/۷۵ *	۱/۳۶ *	ماتریس وزن پایدار	

* نسبت به پاسخهای طبقه هشتم

روش کنترل بهینه آنی با استفاده از ماتریس متقارن شده یانگ نمی‌تواند مقادیر پاسخهای سازه‌ای را به طور مؤثری کاهش دهد. نتایج جدول (۳) نیز حاکی از عدم کارایی مناسب جرم محرک است. این در حالی است که انتخاب ماتریس وزن مناسب برای این روش نیز بسیار دشوار است. روش کنترل بهینه آنی که از ماتریس وزن پایدار استفاده می‌کند عملکرد قابل

در عین حال که این ماتریس بخوبی توانسته است تأثیر قابل ملاحظه‌ای نیز بر روی مد دوم سازه داشته باشد. به بیان دیگر، حاشیه ایمنی که سیستم کنترلی برای اطمینان از پایدار بودن سازه کنترل شده به وجود می‌آورد، به الگوریتم مورد استفاده و انتخاب مناسب ماتریس وزن بستگی کامل دارد.



شکل (۲): طیفهای پاسخ فرکانسی شتاب مطلق بالاترین طبقه ساختمان با استفاده از space روش کنترل بهینه آنی، ماتریس وزن یانگ (مقارن شده) و ماتریس وزن پایدار

۱۰- نتیجه گیری

روش کنترل بهینه آنی ابزاری قوی در کنترل سازه‌ها در مقابل بارهای پیش‌بینی نشده مانند بادهای قوی و زلزله است. این الگوریتم نسبت به تغییر گامهای زمانی در تحلیل‌های عددی بسیار حساس است؛ به طوری که برای هر گام زمانی به یک ماتریس وزن جدید نیاز دارد. تحلیل‌ها نشان می‌دهند که در این روش انتخاب یک ماتریس وزن مناسب به منظور اطمینان از کنترل مؤثر پاسخهای سازه چندان ساده نیست.

در این مقاله با مروری سریع بر الگوریتم کنترل بهینه آنی نقاط ضعف و قوت آن بررسی شد و با روشی مستقیم و منسجم و در عین حال ساده، برگرفته از روش کنترل دیجیتال، روابط کنترل بهینه آنی مجدداً به دست آمده است. مشکل گام زمانی و کارایی این الگوریتم در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های کنترل کلاسیک نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین نشان داده شده است که شاخه‌های دیگر حلقه باز و حلقه باز- بسته در روش کنترل بهینه آنی معنی دار نیستند. در نهایت، برای یک

قبولی داشته و به طور مؤثری می‌تواند پاسخهای سازه‌ای را با حداقل پاسخهای جرم محرک و حداکثر نیروی کنترلی کم، کاهش دهد. بازدهی این روش بسیار نزدیک به روش حلقه بسته کنترل بهینه کلاسیک است.

باتوجه به این بحثها به نظر می‌رسد روش کنترل بهینه آنی روشی کارآمد در کنترل پاسخهای سازه‌ای است، چنانچه از ماتریس وزن پایدار استفاده نماید.

۹- طیف پاسخ فرکانسی

یکی از روشهای ساده برای بررسی مشخصه‌های فرکانسی ارتعاش یک سازه ترسیم طیف پاسخ فرکانسی آن است. در شکل (۲) طیف پاسخ فرکانسی شتاب طبقه هشتم سازه که از روش کنترل بهینه آنی به دست آمده نشان داده شده است. طیف پاسخ از رابطه (۲۳) محاسبه شده است:

$$\left\| \frac{(\ddot{x}_g + \ddot{x}_o)(\omega)}{\ddot{x}_o(\omega)} \right\| \quad (23)$$

در رابطه (۲۳)، $\ddot{x}(\omega)$ به معنای طیف تبدیل فوریه تاریخچه شتاب است که به ترتیب مربوط به زمین و شتاب بالاترین طبقه ساختمان می‌باشد و $\|\dots\|$ نشانه دامنه آن است. بررسیها نشان می‌دهد هنگامی که فرکانس سیستم کنترلی به فرکانس مداول سازه نزدیک باشد تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش انرژی مد اول سازه دارد. این مسأله بوضوح در شکل (۲) قابل مشاهده است. از طرف دیگر، هر چه طیف پاسخ فرکانسی در حوالی قله مد اول ملایمتر باشد کارایی و پایداری سیستم کنترل بیشتر است. در شکل (۲) طیف فرکانسی سازه کنترل نشده با سازه کنترل شده با ماتریس وزن یانگ و ماتریس وزن پایدار مقایسه شده است. می‌توان مشاهده نمود که ماتریس وزن پایدار بیشترین حاشیه ایمنی را برای سازه کنترل شده فراهم می‌نماید.

سازه خاص نشان داده شده است که استفاده از ماتریس وزن پایدار می تواند کارایی بالای سیستم کنترلی را تضمین کند.

۱۱-مراجع

- 1.Kobori, T. (1988). "State-of-the art report. Active seismic response control". *Proc. of the 9th World Conf. on Earthquake Engng.*, 8, 435-46.
- 2.Yao, J. T. P. (1972). "Concept of structural control". *J. Struct. Div., ASCE*, 98(7), 1567-74.
- 3.Bahar, O., Banan, M. R., Mahzoon, M. and Kitagawa, Y. (2003). "Instantaneous optimal Wilson- Θ control method". *ASCE. Eng. Mech., ASCE*, 129, 11, 1268-1276.
- 4.Bahar O., Mahzoon M., and Banan M. R. (2004). "Discrete instantaneous optimal control method". *Iranian Journal of Science and Technology*, 28(B1), 9-20.
- 5.Bahar, O., Banan, M. R., and Mahzoon M. (2005). "Studying the behavior of a building controlled by active mass dampers/drivers using discrete instantaneous optimal control method". *JSEE, Spring*, 7(1), 1-8.
- 6.Soong, T. T. (1990). *Active structural control: Theory and practice*. John Wiley & Sons Inc., New York: NY.
- 7.Yang, J. N., Akbarpour, A., Ghaemmaghami, P. (1985). "Optimal control algorithms for earthquake-excited buildings". Published in *Structural control*, (editor Leipholz), 748-61.
- 8.Yang, J. N., Akbarpour, A., Ghaemmaghami. P. (1987). "New optimal control algorithm for structural control". *J. Eng. Mech., ASCE*, 113(9), 1369-86.
- 9.Yang, J. N., Li, Z. Liu. S. C. (1992). "Stable controllers for instantaneous optimal control". *J. Eng. Mech., ASCE*, 118(8), 1612-30.◀