كنترل فعال ارتعاشات ساختمانهاي بلند با استفاده از روش تخصيص بهينة قطبها

فريدون اميني   دانشيار دانشكدة عمران، دانشگاه علم و صنعت ايران
بهمن فرهمند آذر   مربی گروه عمران – آب، دانشکدة فني، دانشگاه تبريز

چكيده

در كنترل فعال سازهها[۱] با استفاده از روش تخصيص قطبها[۲] ، مسئله تعيين مقادير مناسب براي قطبهاي سيستم حلقه بسته، حائز اهميت زيادي بوده و ميزان انرژي كنترل مورد نياز و همچنين پاسخهاي بيشينة سازة تحت كنترل بهشدت متأثر از آن ميباشد. در اين مقاله مسئله مذكور با استفاده از روش تابع جريمة خارجي[۳]، در قالب يك مدل رياضی بهينهيابی قطبها مطرح و الگوريتم جديد بهينهيابی قطبها براي آن ارائه شده است. نتايج حاصل از بررسي مثـالهاي عـددي متعدد، نشانگر كارآئي بيشتر الگوريتم ارائه شده نسبت به الگوريتم موجود انتخاب قطبها ميباشد.

كلمات كليدی: **كنترل فعال، روش تخصيص قطبها، ساختمانهای بلند، بهينهسازی**

Active Vibration Control of Tall Buildings Using Optimal Pole Assignment Method

F. Amini — Faculty of Civil Eng. Iran University of Science & Technology
B. Farahmand Azar — Dept. of Hydraulics, Faculty of Eng., University of Tabriz

Abstract

In active Structural control using the Pole assignment method, determination of suitable values for the eigenvalues of closed-loop control system is very important and the maximum responses of the controlled structure is very sensitive to it. Here, this problem is formulated as an optimization problem using the exterior penalty function method and a new algorithm is suggested for it. The results of study for several numerical examples, reveals the efficiency of the new algorithm compared to the previous ones.

Key words: Active Control, Pole Assignment Method, Tall Buildings, Optimization

---

1- Active Structural Control
2- Pole Assignment Method
3- Exterior Penalty Function Method

۱- مقدمه

بطور كلي روشهاي مدرن كنترل ارتعاشات در سازههاي مهندسي عمران را ميتوان در دو گروه اصلي كنترل غيرفعال [۱] و كنترل فعال طبقه بندي نمود. ويژگي اصلي روش كنترل فعال در استفاده از منبع انرژي خارجي براي كنترل دامنة ارتعاشات سازه تحت اثر بارهاي ديناميكي نظير باد يا زلزله ميباشد. لذا در كارهاي تحقيقاتي در زمينه كنترل فعال سازهها، چگونگي محاسبة بزرگي و جهت نيروي كنترل مورد نياز در مدت زمان اعمال بار ديناميكي و در لحظات مختلف، يكي از مسائل اساسي است كه به آن پرداخته ميشود و روش تخصيص قطبها يكي از الگوريتمهائي است كه در اين راستا مورد توجه قرار گرفته است.

تاريخچه استفاده از روش تخصيص قطبها در طراحي سيستمهاي كنترل پسخوراندي [۲] مربوط به رشتههاي مهندسي برق و كنترل ميباشد. استفاده از اين روش براي كنترل فعال سازههاي مهندسي عمران در كارهاي پژوهشي اميني، ونگ، كوزين، عبدالرحمان و ليفولز مورد بررسي قرار گرفته است [1,2,7,8].

در سالهاي اخير، كارهاي پژوهشي انجام يافته در ارتباط با روش تخصيص قطبها در رشتة مهندسي عمران بطور عمده در ارتباط با استفاده از پسخوراند شتاب [6,۱۲]، تركيب با روش كنترل بهينه [۳] ، استفاده از شبكه هاي عصبي مصنوعي [۴] [9,10] و براي سازههاي با رفتار غير خطي [۱۳] بوده است.

۲- روش تخصيص قطبها

براي يك سازه با n درجة آزادي و در حالت كلي با سيستم كنترل فعال، دستگاه معادلات تعادل ديناميكي را ميتوان بهصورت زير نوشت:

$$M.\ddot{x}(t)+C.\dot{x}(t)+K.x(t)=D.u(t)+E.f(t) \qquad (۱)$$

كه در آن K,C,M بهترتيب ماتريسهاي جرم، ميرائي و سختي كل سازه، $x(t)$، $\dot{x}(t)$ و $\ddot{x}(t)$ بهترتيب بردارهاي تغيير مكان، سرعت و شتاب و از مرتبة n ميباشند. همچنين

1- Passive Control
2- Feedback Control
3- Optimal Control
4- Artifical Neural Networks

بردارهاي $f(t)$ از مرتبة r و $u(t)$ از مرتبة m بهترتيب شامل نيروهاي خارجي وارد بهسازه و نيروهاي كنترل توليد شده توسط دستگاه محرك [۵] ميباشند كه موقعيت مكاني آنها بهترتيب توسط ماتريس D از مرتبة m *n و E از مرتبة n* r مشخص ميگردد.

دستگاه معادلات (۱) را در فضاي حالت [۶] ميتوان بهصورت زير نوشت [8]:

$$\dot{q}(t)=A.q(t)+B.u(t)+H.f(t) \qquad (۲)$$

كه در آن $q(t)$ بردار حالت از مرتبة 2n و بهصورت زير ميباشد:

$$q(t)=\begin{Bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{Bmatrix} \qquad (۳)$$

همچنين ماتريسهاي حالت A از مرتبة 2n*2n، B از مرتبة 2n* m بهصورت زير ميباشند:

$$A=\begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}.K & -M^{-1}.C \end{bmatrix} \qquad (۴)$$

$$B=\begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}.D \end{bmatrix} \qquad (۵)$$

$$H=\begin{bmatrix} I \\ M^{-1}.E \end{bmatrix} \qquad (۶)$$

بديهي است كه يك سازة معمولي بدون سيستم كنترل فعال، حالت خاصي از بحث فوق بوده و در آن جملة $B.u(t)$ از معادلات حالت حذف ميگردد. با در نظر گرفتن معادلة حالت سازه بدون كنترل فعال، ملاحظه ميگردد كه ماتريس حالت سيستم (A) نمايانگر سيستم ديناميك سيستم حلقه باز بوده و مشخصات ميرائي و سختي سازه، در مقادير ويژة آن مستتر ميباشد. هر گاه در حالت كنترل خطي حلقه بسته [۷]، بردار

5-Actuator
6- State Space
7- Closed Loop

نيروي كنترل $u(t)$ بهصورت تابعي خطي از بردار حالت در نظر گرفته شود،

$$u(t)=F.q(t) \qquad (۷)$$

كه در آن F ماتريس بهره[1] از مرتبة m* 2n بوده و ثابت فرض ميگردد. در اين صورت معادلة حالت سيستم حلقه بسته بهصورت زير خواهد بود:

$$\dot{q}(t)=(A+B.F)q(t)+H.f(t) \qquad (۸)$$

قابل ملاحظه مي‌باشد كه در رابطة (۸) ماتريس حالت سيستم حلقه بسته بهصورت $A+B.F$ ظاهر گرديده است. بديهي است كه چنين اصلاحي در ماتريس حالت سيستم توسط كنترل فعال بهمفهوم تغيير مجازي در نسبتهاي ميرائي مودال و فركانسهاي طبيعي سازه ميباشد و مقادير ويژة A در حالت كلي از مقادير ويژة $A+B.F$ متفاوت ميباشند. براي سيستمهاي سازهاي، اين مقادير ويژه بهصورت زوجهاي مختلط مزدوجي ميباشند كه مطابق رابطة زير به نسبتهاي ميرائي مودال و فركانسهاي طبيعي سازه مربوط ميشوند:

$$\lambda_i\ ,\lambda_i^*=\xi_i.\omega_i \pm j.\omega_i.\sqrt{1-\xi_i^2} \qquad (۹)$$

از آنجائي كه مقادير ويژة سيستم حلقه بسته بيانگر رفتار سيستم كنترل ميباشند، لذا يك روش كنترل عبارتست از انتخاب ماتريس بهرة F بهنحوي كه λ_iها مقادير از پيش تعيين شدهاي را دارا باشند. اين روش بهروش تخصيص قطبها معروف بوده و استفادة مؤثر از آن مستلزم اختصاص مقادير مناسب براي مقادير ويژة سيستم حلقه بسته ميباشد.

۳- مدل رياضي بهينهيابي قطبها

هر گاه فرض كنيم كه نسبتهاي ميرائي مجازي سازة تحت كنترل فعال با اعمال ضريب α به نسبتهاي ميرائي اولية سازه بهصورت زير در نظر گرفته شود:

$$\xi_i^{con}=\alpha\ \xi_i \quad (i=1,2,...,n) \qquad (۱۰)$$

بديهي است كه در چنين شرايطي قطبهاي جديد سيستم حلقه بسته بهصورت زير تعيين ميگردند:

$$\lambda_i,\lambda_i^*=\xi_i^{con}.\omega_i \pm j.\omega_i\sqrt{1-(\xi_i^{con})^2} \qquad (۱۱)$$

هر گاه با استفاده از قطبهاي جديد تخصيص يافته، ماتريس بهرة F محاسبه شده و در نهايت با انتگرالگيري از معادلات حالت و يا معادلات تعادل ديناميكي سازة تحت كنترل فعال، پاسخ سازه در حوزة زمان تعيين گردد، ميتوان مقادير حداكثر تغيير مكان، سرعت و شتاب سازه را مشخص نمود كه بهترتيب با $\ddot{x}_m, \dot{x}_m, x_m$ نشان ميدهيم و مقدار آنها تابعي از α ميباشد. همچنين قدر مطلق حداكثر نيروي كنترل مورد نياز در محدودة زماني مورد نظر را نيز تعيين نموده و آنرا با u_m نشان ميدهيم كه مقدار آن نيز تابعي از α ميباشد.
حال مسئلة بهينهسازي[2] را ميتوان بهصورت زير مطرح نمود:

$$\min imize\ \ u_m(\alpha) \qquad (۱۲)$$

$$subjected\ \ to:$$

$$x_m(\alpha)\ /\ x_a\ \ -1\le 0 \qquad (۱۳)$$

$$\dot{x}_m(\alpha)\ /\ \dot{x}_a-1\le 0 \qquad (۱۴)$$

$$\ddot{x}_m(\alpha)/\ \ddot{x}_a-1\le 0 \qquad (۱۵)$$

$$\alpha\ge 0 \qquad (۱۶)$$

كه در آن $\ddot{x}_a, \dot{x}_a, x_a$ بهترتيب مقادير مجاز تغيير مكان، سرعت و شتاب سازه ميباشند كه توسط طراح تعيين ميگردد.
بهمنظور حل مسئله بهينهسازي فوق، ميدانيم كه نقطه آغاز مربوط بهسازة بدون كنترل فعال ميباشد و يقيناً پاسخهاي حداكثر آن، ارضا كنندة محدوديتهاي مربوط بهمقادير مجاز آنها نميباشد. بديهي است كه در غير اينصورت، نيازي بهاستفاده از سيستم كنترل فعال نخواهد بود. بنابراين نقطة آغاز همواره در

1- Gain Matrix

2- Optimization

خارج از ناحية قابل قبول [1] قرار داشته و روش تابع جريمة خارجي، انتخاب مناسبي ميباشد.

هرگاه توابع محدوديت مطابق روابط (۱۳) تا (۱۵) را بهترتيب با g_1, g_2, وg_3 نشان دهيم، بهصورت زير:

$$g_1(\alpha) = x_m(\alpha) / x_a - 1 \le 0 \qquad (۱۷)$$

$$g_2(\alpha) = \dot{x}_m(\alpha) / \dot{x}_a - 1 \le 0 \qquad (۱۸)$$

$$g_3(\alpha) = \ddot{x}_m(\alpha) / \ddot{x}_a - 1 \le 0 \qquad (۱۹)$$

در اين صورت تابع جريمة خارجي را بهصورت زير تعريف مينمائيم:

$$P(\alpha) = \left[\max(0, g_1)\right]^2 + \left[\max(0, g_2)\right]^2 + \left[\max(0, g_3)\right]^2 \qquad (۲۰)$$

حال مسئله بهينهسازي مقيد مطرح شده را ميتوان بهصورت كمينهسازي نامقيد تابع زير مطرح نمود:

$$\phi(\alpha\ , r_p) = u_m(\alpha) + r_p\ .P(\alpha) \qquad (۲۱)$$

كه در آن r_p يك ضريب اسكالر و نشانگر مقدار جريمه ميباشد. در روش تابع جريمة خارجي، در ابتدا يك مقدار كوچك براي ضريب r_p در نظر گرفته شده و نقطة بهينة مسئله غيرمقيد با استفاده از تكنيكهاي مربوطه پيدا ميشود. سپس ضريب r_p قدري افزايش داده شده و با شروع از نقطة بهينة گام قبلي، نقطة بهينة جديد حاصل ميگردد و اين روند افزايش تدريجي ضريب r_p و حل مسائل بهينهسازي نامقيد متوالي تا جايي ادامه داده ميشود كه نقطة بهينه مسئله اصلي با دقت مناسبي حاصل گردد.

با نگاهي دقيقتر به رابطه (۲۱) ملاحظه ميشود كه در طراحي سيستم كنترل فعال، r_p بهعنوان يك ابزار سودمند در دست طراح بوده و اختصاص مقادير عددي مختلف براي آن، نشانگر اهميت نسبي كاهش پاسخهاي حداكثر سازه و يا استفاده از انرژي كنترل كمتر در روند طراحي ميباشد. بنابراين نقش ضريب مذكور در روش حاضر بيشباهت به نقش ماتريسهاي R,Q در روش كنترل بهينه نمي باشد.

در اينجا بايستي متذكر شد كه در اغلب كارهاي پژوهشي مبتني بر روشهاي كنترل بهينه، مقادير مجاز پاسخهاي سازه و نامساويهاي محدوديت مربوط به آنها در مدل رياضي بهينه سازي مدنظر قرار نميگيرد. همچنين در روشهاي كنترل بهينه اغلب طراحي سيستم كنترل بهصورت حلقه باز- بسته و يا حتي حلقه باز بوده و نتايج حاصل از اين روشها بهشدت متأثر از نحوة انتخاب ماتريسهاي وزن R,Q ميباشد. لذا امكان مقايسة عددي مابين نتايج روشهاي مذكور و روش مورد بحث در اين مقاله بهسادگي ميسر نبوده و نتايج چنين مقايسهاي نيز بهلحاظ پژوهشي، مثمر ثمر نخواهد بود.

۴- الگوريتم جديد بهينهيابي قطبها

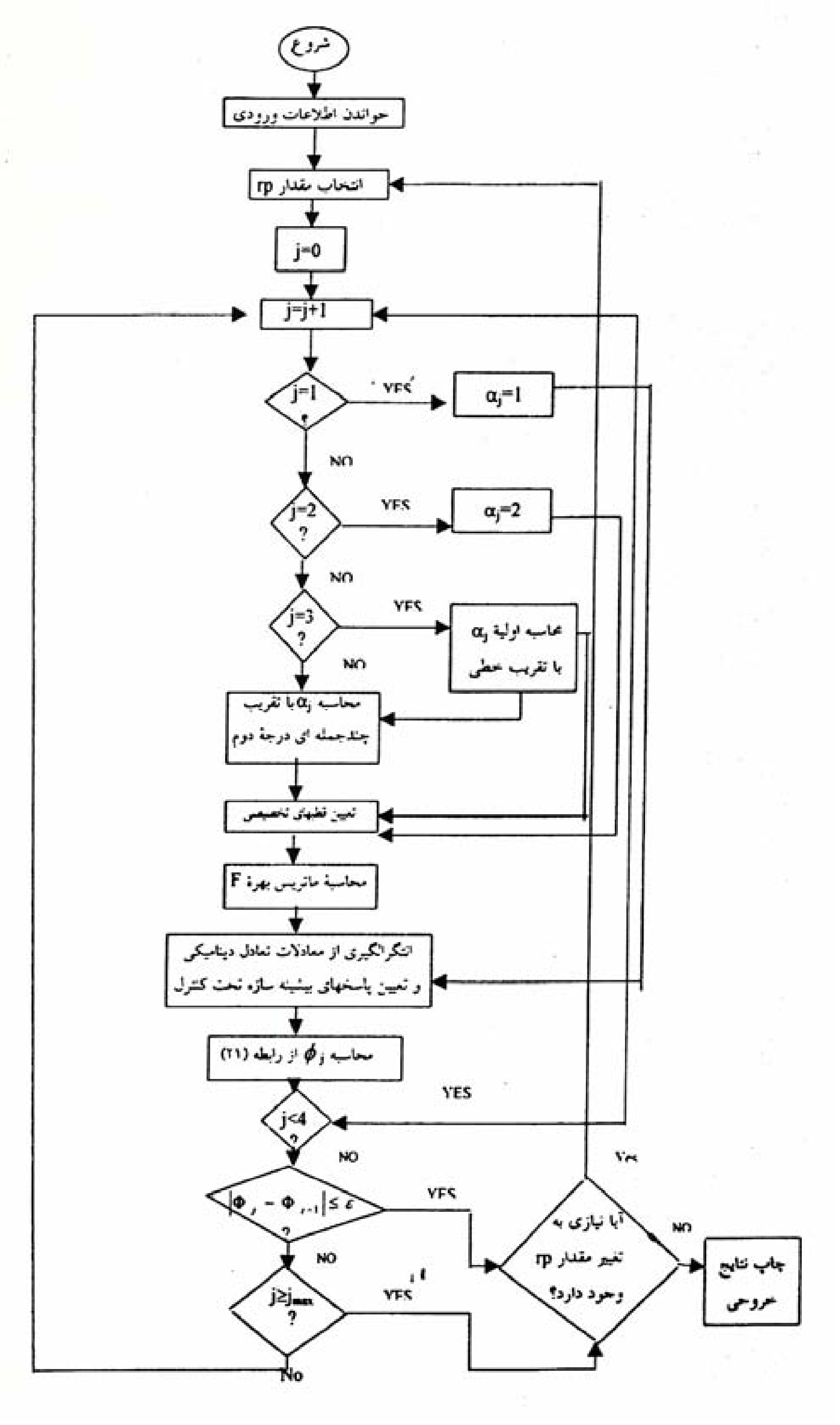
براي حل مسئله كمينهسازي نامقيد تابع ϕ مطابق رابطه (۲۱)، روش تقريب چند جملهای درجة دوم مورد استفاده قرار گرفته است. نمودار جريان الگوريتم جديد بهينهيابي قطبها نيز در شكل (۱) ارائه گرديده است.

۵- مثالها

مثال۱: ساختمان برشي ۵ طبقه تحت اثر بار ديناميكي باد كه در مرجع شماره [1] بررسي شده است، در اينجا مجدداً مورد مطالعه قرار گرفته و ملاحظه گرديد كه با استفاده از الگوريتم جديد بهينهيابي قطبها، طراحي سيستم كنترل فعال بهنحو مؤثرتري امكانپذير ميباشد. در مثال مذكور جرم هر كدام از طبقات ساختمان برابر ۳۵۰ تن، سختي جانبي طبقات ساختمان بهترتيب از طبقة پائين برابر ۲۸۰۰،۳۲۰۰،۳۴۰۰،۴۰۰۰ و ۲۰۰۰كيلو نيوتن بر سانتيمتر و نسبت ميرائي براي هر كدام از مودهاي ارتعاشي ساختمان برابر ۰/۰۲ ميباشد. همچنين بردار بار دینامیکی طبقات ساختمان مطابق زير می باشد:

$$f(t) = \begin{Bmatrix} 1850 \\ 1860 \\ 1870 \\ 1880 \\ 1890 \end{Bmatrix} Sin 2.18t\ \ (kN) \qquad (۲۲)$$

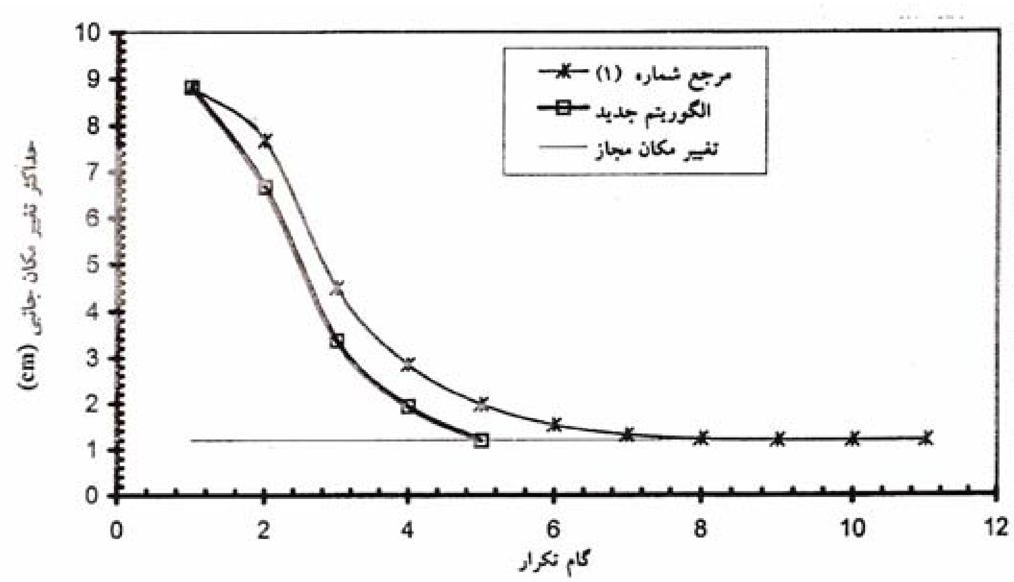
1- Feasible Region



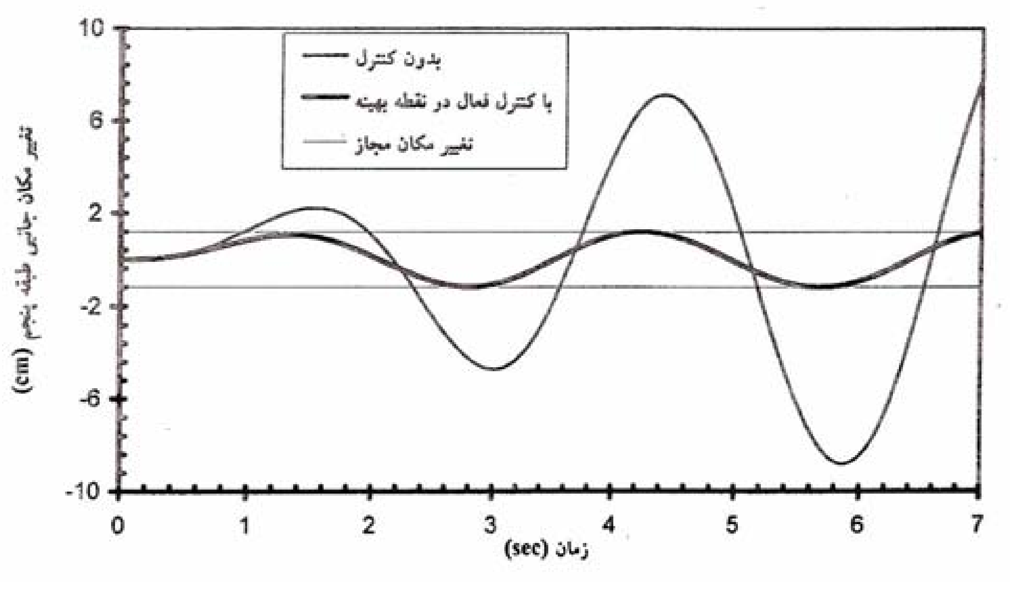
شکل ۱- نمودار جریان الگوریتم جدید انتخاب قطبها

براساس محاسبات انجام یافته، حداکثر تغییر مکان جانبي طبقات ساختمان در غیاب سیستم کنترل فعال برابر ۸/۸۲ سانتیمتر بوده و مقدار مجاز آن براي طراحي سیستم کنترل فعال برابر ۱/۲ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. کاهش تغییر مکان جانبی حداکثر طبقات ساختمان در گامهای تکرار محاسبات بهینهیابی قطبها در شکل (۲) و منحنیهای پاسخ تغییر مکان و نیروی کنترل طبقة پنجم بهازاء زمان بهترتیب در اشکال شمارة (۳) و (۴) ارائه گردیده است

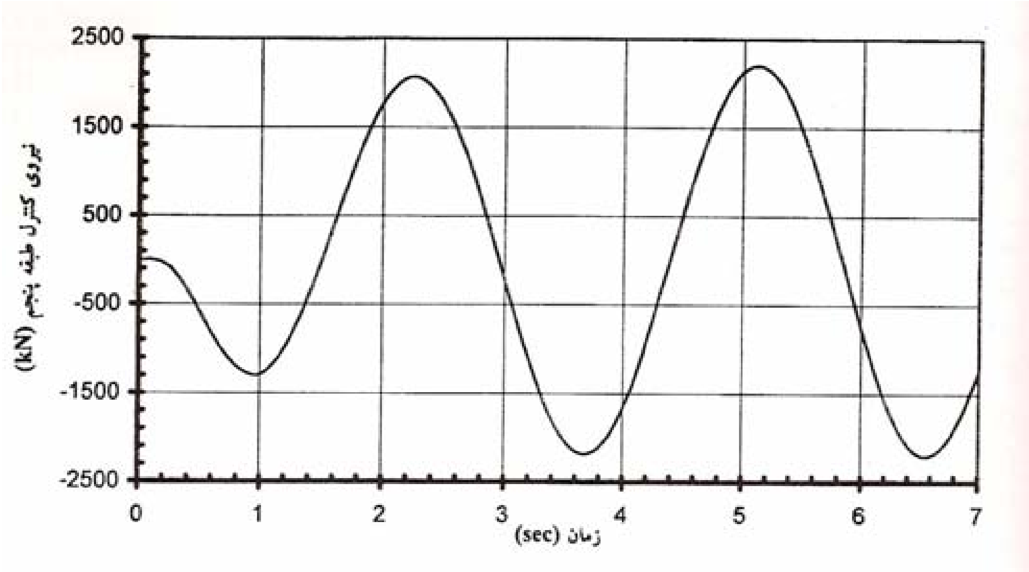
مثال ۲: این مثال نیز در مرجع شمارة [1] مورد بررسی قرار گرفته و طی آن رفتار ساختمان ۵ طبقه مثال ۱ تحت اثر ۶/۲۹ ثانیة اول شتابنگاشت مؤلفه شمالي – جنوبي زلزله ال سنترو (۱۹۹۰) مورد مطالعه واقع گردیده است.



شکل ۲- تغییر مکان جانبی حداکثر طبقات ساختمان در گامهای تکرار محاسبات بهینه یابی قطبها

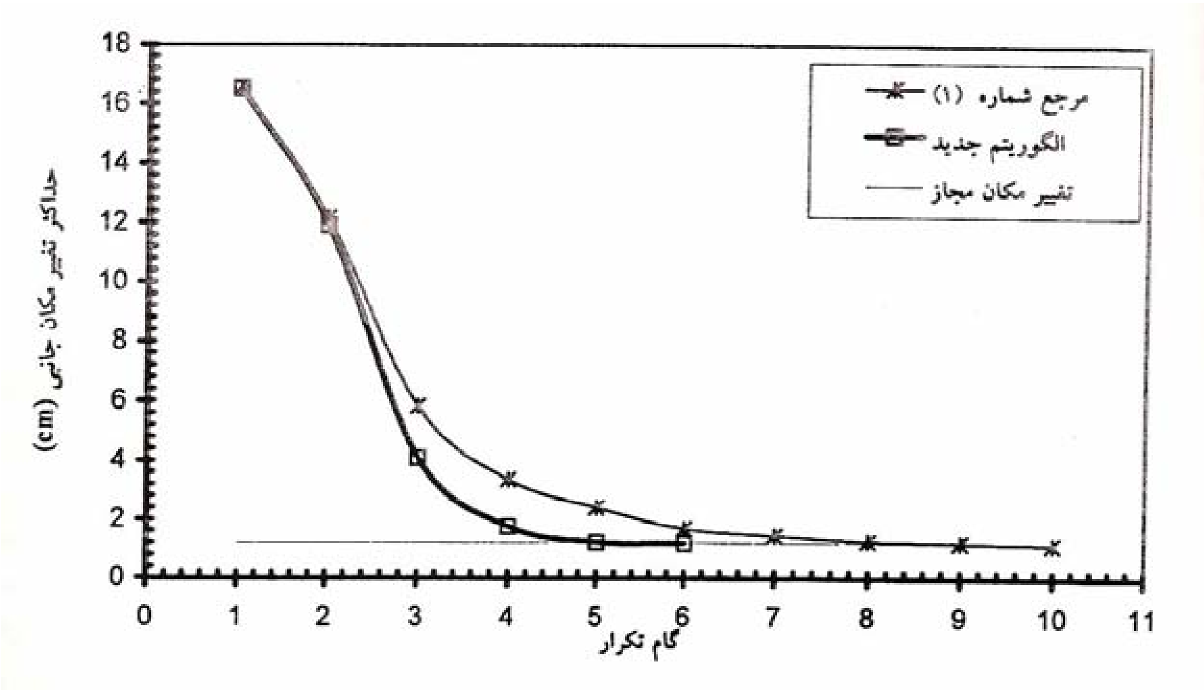


شکل ۳- منحنی پاسخ تغییر مکان جانبی طبقه پنجم در دو حالت بدون کنترل و با کنترل فعال در نقطه بهینه

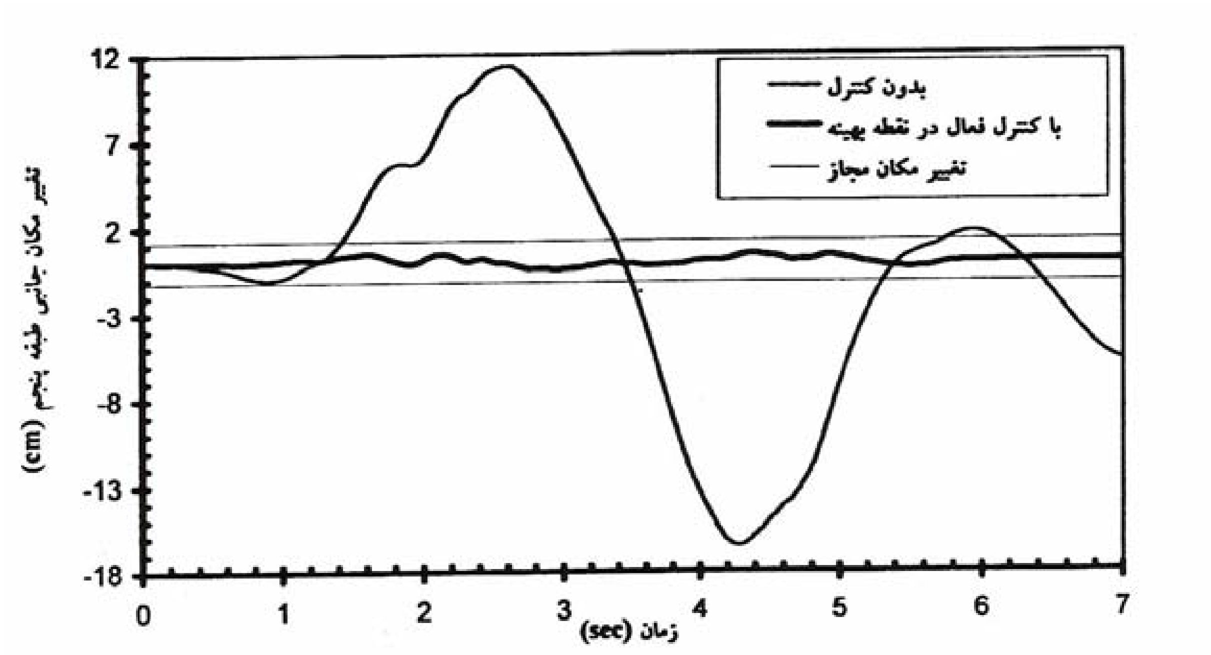


شکل ۴- منحنی تغییرات نیروی کنترل طبقه پنجم به ازاء زمان در نقطه بهینه

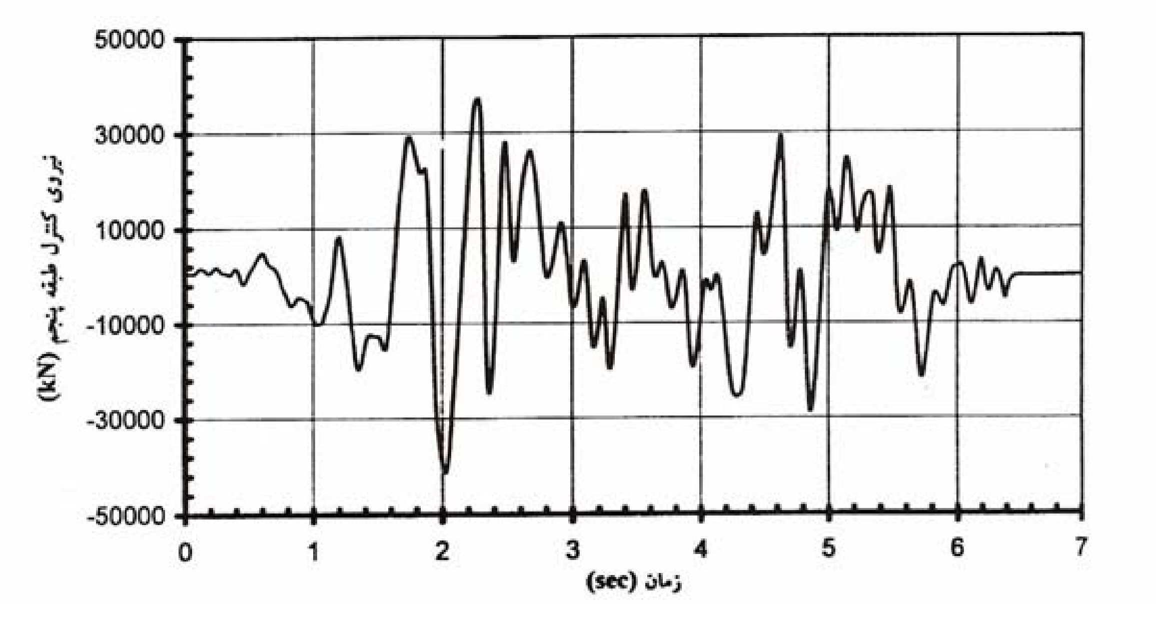
براساس محاسبات انجام یافته، حداکثر تغییر مکان جانبي طبقات ساختمان در غیاب سیستم کنترل فعال در حدود ۱۶/۵۳ سانتیمتر بوده و مقدار مجاز آن براي طراحي سیستم کنترل فعال برابر ۱/۲ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. کاهش تغییر مکان جانبی حداکثر طبقات ساختمان در گامهای تکرار محاسبات بهینهیابی قطبها در شکل (۵) و منحنیهای پاسخ تغییر مکان و نیروی کنترل طبقة پنجم بهازاء زمان بهترتیب در اشکال شمارة (۶) و (۷) ارائه گردیده است.



شکل ۵-تغییر مکان جانبی حداکثر طبقات ساختمان در گامهای تکرار محاسبات بهینه یابی قطبها



شکل ۶- منحنی پاسخ تغییر مکان جانبی طبقه پنجم در دو حالت بدون کنترل و با کنترل فعال در نقطه بهینه



شکل ۷- منحنی تغییرات نیروی کنترل طبقه پنجم به ازاء زمان در نقطه

۶-نتیجه گیري

در این مقاله، مسئله انتخاب مقادیر مناسب براي قطبهاي سیستم حلقه بسته، با استفاده از روش تابع جریمه خارجي، در یك قالب جدید فرمول‌بنـــدي شده و بر مبناي الگوریتم ارائه شده، برنامه کامپیوتري تهیه و با مثالهاي مختلف مورد ارزیابي قرارگرفته است. اگر چه در فرمولبندي و الگوریتم جدید، با انتخاب مقادیر مناسب براي ضریب تابع جریمه میتوان سرعت همگرائي و تعداد گامهاي تکرار را بهنحو مؤثري بهبود بخشید،

ليكن هدف اصلي از ارائه الگوريتم جديد، طرح مدل رياضی بهینهیابی قطبها بهصورت سيستماتيك براي تضمين هرچه بيشتر همگرائي بهنقطه بهینه واقعي و همچنين امكان قضاوت مهندسي ما بين كاهش پاسخهاي حداكثر سازه و حداكثر نيروي كنترل مورد نياز در طراحي سيستم كنترل فعال بوده است.

نمادها

M	ماتریس جرم سازه
C	ماتریس میرائی سازه
K	ماتریس سختی سازه
$x(t)$	بردار تغییر مکان سازه
$\dot{x}(t)$	بردار سرعت سازه
$\ddot{x}(t)$	بردار شتاب سازه
D	ماتریس موقعیت مکانی نیروی کنترل
E	ماتریس موقعیت مکانی تحریک خارجی
u(t)	بردار نیروی کنترل
f(t)	بردار نیروی خارجی
q(t)	بردار حالت سیستم
A	ماتریس حالت سیستم
F	ماتریس بهره
λ_i	مقادیر ویژهٔ سیستم حلقه بسته
ζ_i	نسبتهای میرائی مودال برای سازهٔ بدون کنترل
ζ_i^{con}	نسبتهای میرائی مودال برای سازهٔ تحت کنترل فعال
ω_i	فرکانسهای طبیعی سازه
u_m	بیشینهٔ لحظهای نیروی کنترل
$P(\alpha)$	تابع جریمه
r_p	ضریب تابع جریمه

مراجع

[1] Amini, F.(1982). Active Control of Multistory Structures by Pole Assignment Method. Ph.D. Dessertation, Polytechnic Institute of New York.

[2] Amini, F., Wang, P. C. and Kozin, F. (1983). Vibration Control of Tall Buildings. Engineering Structures 5, pp 282-289.

[3] Tang,Yu (1996). New Algorithm for Active Structural Control. J. Struct. Eng., ASCE, 122(9), pp 1081-1088.

[4] Fur, Lih-Shing and Yang, T.Y. (1997). Vibration Control of Tall Buildings under Seismic and Wind Loads. J. Struct. Eng., ASCE. 122(8), pp 948-957.

[5] Casciati, F. and yao, T. (1994). Comparison of Strategies for the Active Control of Civil Structures. Proc. First world Conference on Structural Control, 1WCSC, Los Angeles, USA.

[6] Amini, F. (1996). New Algorithm in Active Control by Considering Active Forces as Function of Accelerations, Velocities and Displacements. Proc. First European Conference on Structural Control, Barselona, Spain.

[7] Leipholz, H. H. E. (1986). Control of Structures. Martinus Nijhoff Publishers.

[8] Soong,T.T.(1990). Active Structural Control, Theory and Practice. John Wiley & Sons Inc.

[9] Kumagai,T. (1993). Control of an Active Mass Damper using a Neural Network.Transactions of the Japan Society of Mech. Eng. Vol. 59, No. 564.

[10] Hashemian, H. (1995). A Decentralized Approach to Control of Civil Structures. Proc. American Control Conference, Seattle, Washington.

[11] Ankireddi, S. and Yang, T. Y. (1996). Simple ATMD Control Methodology for Tall Buildings Subject to Wind Loads. J. Struct. Div., ASCE, 122(1), pp 83-91

[۱۲] امینـي، فریـدون (۱۳۷۵)، منظـور كـردن اثـر شـتاب در كاربرد كنترل فعال براي مقاوم سـازي سـازههـا در برابـر زلزله، گـزارش نهـائي طـرح پژوهـشي، دانـشكدة عمـران، دانشگاه علم و صنعت ايران.

[۱۳] فرهمنـــد آذر، بهمـــن(۱۳۷۸)، كنتـــرل ارتعاشـــات در ساختمانهاي بلند با اسـتفاده از روش تخـصيص قطبهـاي تعميم يافتـه و شـبكههـاي عـصبي مـصنوعي، پايـاننامـه دكتري، دانشكده عمران، دانشگاه علم و صنعت ايران.